



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

JEŘÁB MOSTOVÝ JEDNONOSNÍKOVÝ

BRIDGE CRANE ONE-GIRDER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Stanislav Stanec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Stanislav Stanec**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Jeřáb mostový jednonosníkový

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukce a výpočty jednonosníkového mostového jeřábu pro zadané parametry:
nosnost 10 000 kg,
rozpětí 12 000 mm,
rozvor 2 500 mm,
zdvih 7 000 mm.

Cíle diplomové práce:

Vypracovat technickou zprávu s rozбором volby řešení konstrukce, s důležitými technickými a pevnostními výpočty.
Provést podrobný rozbor konstrukčních řešení skříňového nosníku.
Nakreslit sestavný výkres jeřábu, vybrané detailní výkresy.
Provést pevnostní kontrolu vybraných dílů.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021426290.

BIGOŠ, Peter, Jozef KULKA, Melichar KOPAS a Martin MANTIČ. Teória a stavba zdvihačích a dopravných zariadení. Vyd. 1. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2012. Edícia vedeckej a odbornej literatúry (Technická univerzita v Košiciach). ISBN 9788055311876.

POLÁK, Jaromír, Jiří PAVLISKA a Aleš SLÍVA. Dopravní a manipulační zařízení I. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 8024800438.

KOVÁČ, Milan a Vladimír KLAPITA. Manipulácia s materiálom v doprave. 1. vyd. V Žiline: EDIS, 2003. ISBN 8080701741.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 8086490742.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem a výpočtem jednonosíkového mostového jeřábu s požadovanými základními parametry: nosnost 10 000 kg, rozpětí jeřábu 12 000 mm, rozvor 2 500 mm a zdvih 7 000 mm.

V diplomové práci je proveden rozbor konstrukčních řešení skříňových nosníků, vypracována technická zpráva s rozbořem volby řešení konstrukce s důležitými technickými a pevnostními výpočty. Výpočty byly provedeny dle platných Českých státních norem a literatury. K práci je přiložena výkresová dokumentace.

Klíčová slova

mostový jeřáb, hlavní nosník, most, příčník, břemeno, kočka, maximální zatížení, pásnice, stojina, pojezdová kola, rozpětí, rozvor

Abstract

This diploma thesis deals with constructional design and a calculation of one-girder bridge crane with the requested primary parameters: lifting capacity 10 000 kg, span 12 000 mm, wheel base 2 500 mm, travel height 7 000 mm.

In diploma thesis, there is executed analysis of constructional designs of box girders, drawn up technical report with the analysis of the choice of the construction with important technical and physical calculations. Calculations were executed according to valid Czech state norms and literature. Drawing documentation is enclosed to this thesis.

Key words

bridge crane, main girder, bridge, crossbeam, load, travelling crab, lifting capacity, flange, stem, wheel blocks, span, wheel base

Bibliografická citace

Bc. STANEC, S. *Jeřáb mostový jednonosníkový*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval a napsal samostatně pod vedením pana doc. Ing. Jiřího Maláška, Ph.D. a veškerou použitou literaturu jsem uvedl v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 26. 5. 2017

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Maláškovi, Ph.D. za poskytnuté cenné rady a odborné vedení při tvorbě této práce.

Mé díky patří také rodičům za jejich podporu po celou dobu studia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1. CÍLE PRÁCE A ROZDĚLENÍ JEŘÁBŮ.....	12
1.1. Hlavní cíle	12
1.2. Rozdělení jeřábů.....	12
1.3. Typy skříňových nosníků.....	15
2. PARAMETRY A ZVOLENÁ KONCEPCE MOSTU	16
3. NÁVRH HLAVNÍHO NOSNÍKU MOSTU	17
3.1. Reakce kol kočky	17
3.2. Minimální kvadratický moment průřezu.....	18
3.3. Rozměry hlavního nosníku	18
3.4. Zvolené rozměry nosníku.....	20
3.5. Skutečný kvadratický moment průřezu.....	21
3.6. Hmotnost nosníku	21
4. PEVNOSTNÍ VÝPOČET HLAVNÍHO NOSNÍKU	23
4.1. Kontrola nosníku na průhyb.....	23
4.2. Vnitřní silové účinky.....	24
4.2.1. Svislé vnitřní silové účinky	24
4.2.2. Vodorovné silové účinky.....	30
4.3. Posouzení únosnosti hlavního nosníku	32
4.3.1. Posouzení statické únosnosti hlavního nosníku	32
4.3.2. Posouzení únavové pevnosti hlavního nosníku.....	34
4.3.3. Napětí ve stojně	40
5. NÁVRH PŘÍČNÍKU	43
5.1. Minimální kvadratický moment průřezu.....	43
5.2. Volba průřezu.....	43
6. PEVNOSTNÍ VÝPOČET PŘÍČNÍKU	45
6.1. Výpočet průhybu příčnicku.....	45
6.2. Vnitřní silové účinky.....	45
6.2.1. Svislé vnitřní silové účinky	45
6.2.2. Vodorovné vnitřní silové účinky	48

6.3.	Posouzení únosnosti příčnicku.....	49
6.3.1.	Posouzení statické únosnosti příčnicku.....	49
6.3.2.	Prokázání únavové pevnosti příčnicku.....	50
7.	KOMBINACE NAMÁHÁNÍ.....	53
7.1.	Kombinace C3.....	56
8.	VÝPOČET POMOCÍ MKP	58
9.	POJEZDOVÁ KOLA.....	64
10.	SPOJENÍ HLAVNÍHO NOSNÍKU S PŘÍČNÍKEM	66
	ZÁVĚR	67
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	68
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
	PŘÍLOHY	77

ÚVOD

Historie zdvihání břemen sahá do doby vzniku prvních civilizací a jejich stavitelství. V úplném počátku vývoje se musela břemena přemísťovat pouze lidskou silou. Někdy kolem roku 3000 před naším letopočtem nastal okamžik, kdy staří Sumerové vynalezli kolo. Je pravděpodobné, že zanedlouho poté byla vyrobena i první kladka. Není však doloženo, kdo kladku opravdu vymyslel, protože spolehlivé doklady pocházejí až z období starověkého Řecka a Říma. Antičtí stavitelé již dokonce mohli znát kladkostroj, tedy důmyslnou soustavu kladek ke zdvihání břemen. Za vynálezce kladky a samotného kladkostroje je považován Archimédes. Je po něm také pojmenován Archimédův kladkostroj. Ve starém Egyptě byl používán vahadlový jeřáb, který se používal zejména na čerpání vody ze studní. Základní funkce jeřábů a jejich princip se od starověku po dnešek příliš nezměnily. Pouze zdroj energie, který by jeřáb poháněl, byl dlouhodobě problémem. Po mnoha staletích, kdy bylo nutné využívat pouze lidské a zvířecí síly, jej vyřešila parní energie, kterou brzy nahradila energie elektrická.



Obr. 1 Historický jeřáb (volné dílo) [1]

1. CÍLE PRÁCE A ROZDĚLENÍ JEŘÁBŮ

1.1.Hlavní cíle

Hlavním cílem diplomové práce bylo vypracovat technickou zprávu s rozбором volby řešení konstrukce s důležitými technickými a pevnostními výpočty. Provést podrobný rozbor konstrukčních řešení skříňového nosníku. Nakreslit sestavný výkres jeřábu a vybrané detailní výkresy. Provést pevnostní kontrolu vybraných dílů.

1.2.Rozdělení jeřábů

Samotný vývoj zdvihacích zařízení není dodnes ukončen. Vlivem velkého průmyslového rozmachu vznikají nové druhy a typy zdvihacích zařízení. Liší se jak tvarem, tak i jinými znaky, zvyšuje se jejich pracovní spolehlivost. Rozdělují se z hlediska tvaru, druhu pohonu, druhu pohybu, druhu práce a místa použití.

Podle konstrukce jeřábu dělíme jeřáby na:

Jeřáby mostového typu

- **mostový jeřáb** – jeřáb, jehož most se opírá podvozkem přímo o jeřábovou dráhu
- **portálový mostový jeřáb** – jeřáb mostového typu, jehož most se opírá o jeřábovou dráhu pomocí podpěr
- **poloportálový mostový jeřáb** – jeřáb mostového typu, jehož most se opírá o jeřábovou dráhu z jedné strany bezprostředně a z druhé strany pomocí podpěry (nohy)

Jeřáby s nosnými lany

- **lanový jeřáb** – jeřáb s nosnými lany upevněnými v horní části podpěr
- **mostový lanový jeřáb** – jeřáb s nosnými lany upevněnými na koncích mostu osazeného na podpěrách (nohách)

Jeřáb výložníkového typu

- **portálový otočný jeřáb** – osazený otočně na portálu umožňujícím pojezd železničních vagónů nebo cestných vozidel pod ním
- **poloportálový otočný jeřáb** – osazený otočně na poloportálu umožňujícím pojezd železničních vagónů nebo cestných vozidel pod ním
- **mobilní jeřáb** – může být vybavený přídatnou výložníkovou nadstavbou, schopný jízdy s břemenem nebo bez něho, který nepotřebuje pevnou jízdní dráhu
- **věžový jeřáb** – otočný jeřáb výložníkového typu s výložníkem umístěným v horní části svislé věže
- **železniční jeřáb** – výložníkový jeřáb na železničním podvozku způsobilý pro činnost na železničních trasách
- **plovoucí jeřáby** – jeřáb trvale umístěný na speciálním pontonu buď s vlastním pohonem, nebo vlečným, určený k nesení a dopravě jeřábu

- *palubní jeřáb* – otočný jeřáb umístěný na palubě lodě, určený k nakládce a vykládce břemen na loď a z lodě
- *stožárový jeřáb* – jeřáb výložníkového typu, otočný, s výložníkem upevněným v kloubu v dolní části svislého stožáru, který má horní a dolní podpěru
- *konzolový jeřáb* – jeřáb výložníkového typu, jehož prostředek pro uchopení břemene je zavěšený na konzole spojené se sloupem nebo na kočce, která se pohybuje po konzole

MOSTOVÉ JEŘÁBY

V praxi jde o nejvyužívanější typ zdvihacího zařízení. Slouží k bezpečné a přesné manipulaci s břemenem a jsou jednoduše ovladatelné.

Podle tvaru nebo účelu rozeznáváme mostové jeřáby:

- normální s hákem
- drapákové a magnetové
- zvláštní konstrukce
- hutnické

Podle pohonu bývají nejčastěji elektrické jeřáby s mechanickými nebo hydraulickými převody.

Podle pracovního místa mohou být:

- dílenské
- montážní
- hutní

Mostový jeřáb se skládá:

- z jeřábového mostu s jedním nebo více nosíky, dvěma příčníky, pomocnými lávkami a nárazníky
- jeřábové kočky s mechanismy zdvihu a pojezdu
- mechanismu pojezdu mostu včetně pojízďecích kol
- kabiny obsluhy jeřábu
- elektrické instalace k jeřábu a kočce [2], str. 13-16



Obr. 2 Mostový jeřáb jednonosíkový [3]



Obr. 3 Mostový jeřáb dvounosíkový [4]

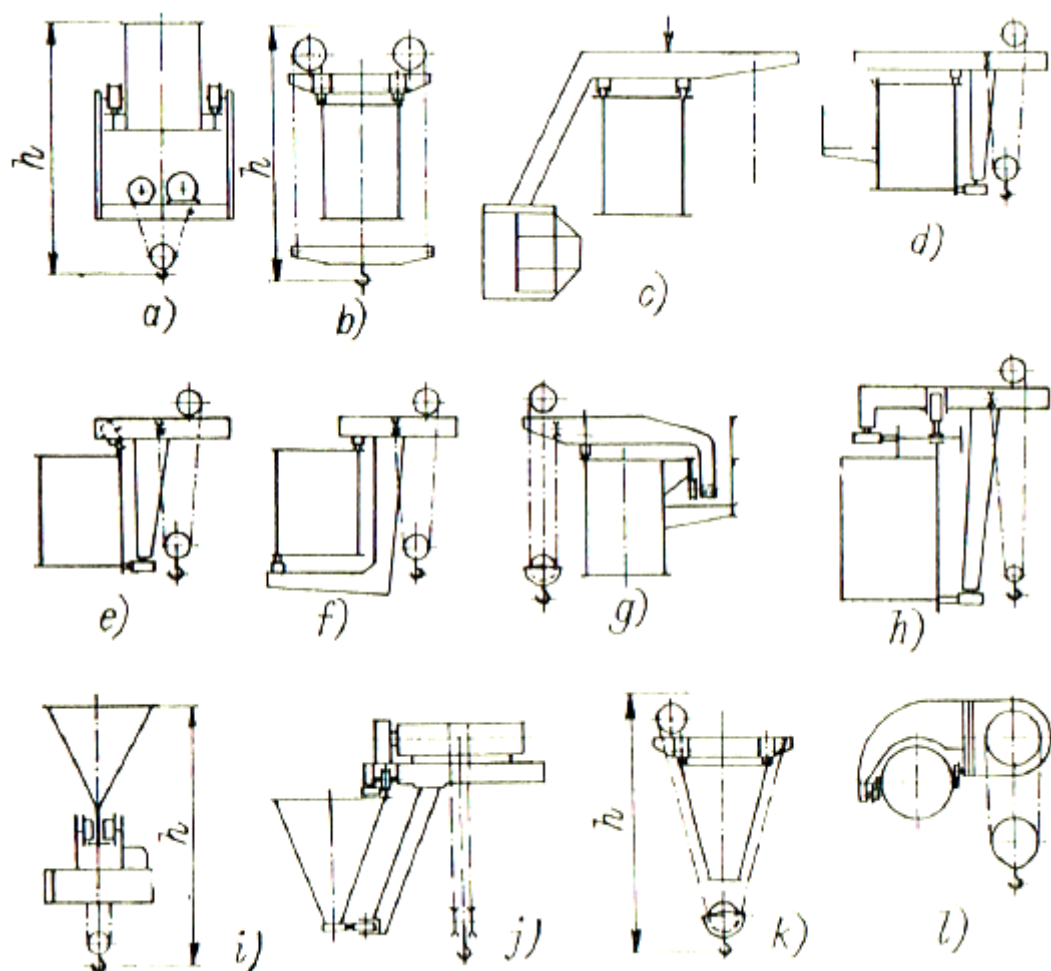
1.3. Typy skříňových nosníků

Nejčastějším tvarem profilu je určitě obdélníkový. Další, které se používají, mohou být trojúhelníkové, lichoběžníkové, výjimečně kruhové. Rozhodující je však uspořádání nosník-kočka. Uspořádání se dělí na:

Symetrické – nevýhodou tohoto uspořádání je velká stavební výška, výhodou naopak absence výraznějšího namáhání na krut (případ a), b), i), k)).

Asymetrické – nevýhodou je namáhání nosníku na krut a nebezpečí překlopení kočky. A proto musí být splněna podmínka, že výslednice sil musí ležet mezi oběma kolejnicemi (případ d)). Je zde i namáhání hlavního nosníku na krut.

Konzolové – odpadá zde nebezpečí překlopení kočky, ale je zde výrazné namáhání na krut z důvodu že se břemeno, stejně jako u asymetrického, zvedá po straně nosníku.[2], str. 17



Obr. 4 Typy průřezů a uspořádání skříňových nosníků [2], str. 18

2. PARAMETRY A ZVOLENÁ KONCEPCE MOSTU

S ohledem na zadané rozpětí a nosnost jeřábu byla pro hlavní nosník mostu zvolena skříňová svařovaná koncepce. Kočka pojíždí po dolní přírubě skříňového nosníku. Příčníky byly řešeny také jako skříňové z válcovaného profilu.

Parametry kočky, které jsou potřebné k výpočtu jeřábu, byly převzaty z katalogu firmy GIGA s.r.o. [5] Zvolená kočka dosahuje požadované nosnosti 10 000 kg. Jedná se o kočku se sníženou stavební výškou, což je pro toto uspořádání nosník-kočka výhodné. Jeřáb pracuje v uzavřené hale.

Parametry jeřábu a kočky:

Nosnost:	10 000 kg
Rozpětí:	12 000 mm
Rozvor:	2 500 mm
Zdvih:	7 000 mm
Rychlost pojezdu:	max. 50 m/min
Rychlost zdvihu:	0,2 ÷ 5 m/min
Hmotnost kočky:	985 kg
Rychlost pojezdu kočky:	5 ÷ 20 m/min
Rozvor kočky:	940 mm
Rozchod kočky:	344 mm, dle konstrukce jeřábu
Způsob ovládání:	frekvenční měnič

Klasifikace jeřábu: [19]

Třída využívání:	U6
Stav zatěžování:	Q3
Skupinová klasifikace:	A7

Klasifikace mechanismů: [19]

Třída využívání:	T3
Stav zatěžování:	L3
Skupinová klasifikace:	M4

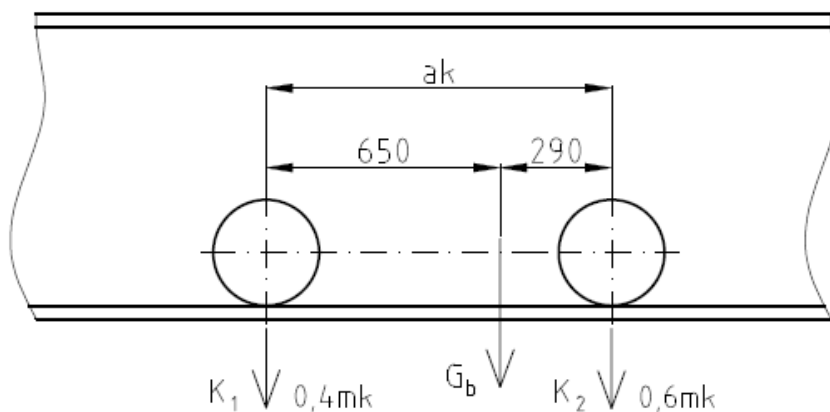
3. NÁVRH HLAVNÍHO NOSNÍKU MOSTU

Pro všeobecný návrh jeřábu byly použity vztahy a postupy z doporučené odborné literatury a z norem řady ČSN EN 13001.

Na ocelovou konstrukci byla použita ocel S235JRG2 (11 375)

3.1.Reakce kol kočky

Svislé vnější zatížení hlavního nosníku je dáno hmotností břemene a hmotností kočky. Na každou dvojici kol, ležící proti sobě, působí jiný hmotnostní podíl kočky. Když se podíváme na nosník jako 2D úlohu, je zatížen dvojicí sil o různé velikosti. Byla vybrána poloha háku pro maximální zatížení na jedno kolo kočky s tím, že je břemeno uprostřed nosníku. V této poloze vzniká i největší ohybový moment na nosník. Pro výpočet reakcí byly použity vztahy a hodnoty dle [5].



Obr. 5 Reakce pod koly pojíždějící kočky [vlastní práce]

$$K_2 = \left(\frac{650}{940} \cdot G_b + 0,6 \cdot m_k \right) \cdot g \quad (3.1)$$

$$K_2 = \left(\frac{650}{940} \cdot 10000 + 0,6 \cdot 985 \right) \cdot 9,81 = 73632,9 \text{ N}$$

$$K_2 = 73632,9 \text{ N}$$

$$K_1 = \left(\frac{290}{940} \cdot G_b + 0,4 \cdot m_k \right) \cdot g \quad (3.2)$$

$$K_1 = \left(\frac{290}{940} \cdot 10000 + 0,4 \cdot 985 \right) \cdot 9,81$$

$$K_1 = 34129,97 \text{ N}$$

Kde:

$G_b = 10000 \text{ kg}$, dle zadání

$m_k = 985 \text{ kg}$, dle [5]

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

3.2. Minimální kvadratický moment průřezu

Minimální kvadratický moment průřezu byl určen ze vztahu pro průhyb prostého nosníku na dvou podporách zatíženého dvěma silami. Ze vztahu pro průhyb [6], str. 616 se vyjádřil I_{xmin} s tím, že se za průhyb f dosadil maximální dovolený průhyb $f_d = L/500$. [6], str. 606

$$f_d = \frac{(K_1 + K_2) \cdot (L - a_k) \cdot [3 \cdot L^2 - (L - a_k)^2]}{96 \cdot E \cdot I_{xmin}}$$
$$\Rightarrow I_{xmin} = \frac{(K_1 + K_2) \cdot (L - a_k) \cdot [3 \cdot L^2 - (L - a_k)^2]}{96 \cdot E \cdot f_d} \quad (3.3)$$

$$I_{xmin} = \frac{(34129,971 + 73632,9) \cdot (12000 - 940) \cdot [3 \cdot 12000^2 - (12000 - 940)^2]}{96 \cdot 210000 \cdot \frac{12000}{500}}$$

$$I_{xmin} = 7,63 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Kde:

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

$a_k = 940 \text{ mm}$, dle [5]

$E = 210000 \text{ MPa}$

$f_d = \frac{12000}{500} = 24 \text{ mm}$, dle [6], str. 606

3.3. Rozměry hlavního nosníku

Podle empirických poměrových vztahů vycházejících z rozpětí jeřábu dle [7], str. 110 a [8], str. 485, bylo možné předběžně určit teoreticky možné rozsahy rozměrů průřezu nosníku.

Výška nosníku

$$\frac{h}{L} = \frac{1}{15 \div 20} \Rightarrow h = L \cdot \left(\frac{1}{15 \div 20} \right) \quad (3.4)$$

$$h = 12000 \cdot \left(\frac{1}{15 \div 20} \right) = 600 \div 800 \text{ mm}$$

zvoleno $h = 750 \text{ mm}$

Kde:

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

Šířka pásnice

$$\frac{b_p}{L} = \frac{1}{30 \div 40} \Rightarrow b_p = L \cdot \left(\frac{1}{30 \div 40} \right) \quad (3.5)$$

$$b_p = 12000 \cdot \left(\frac{1}{30 \div 40} \right) = 300 \div 400 \text{ mm}$$

zvoleno $b_p = 380 \text{ mm}$

Kde:

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

Šířka stojiny

Pro zjednodušení byla dosazena za výšku stojiny h_s celková výška nosníku h .

$$\frac{b_s}{h_s} = \frac{1}{120 \div 240} \Rightarrow b_s = h_s \cdot \left(\frac{1}{120 \div 240} \right) \quad (3.6)$$

$$b_s = 750 \cdot \left(\frac{1}{120 \div 240} \right) = 3,125 \div 6,25 \text{ mm}$$

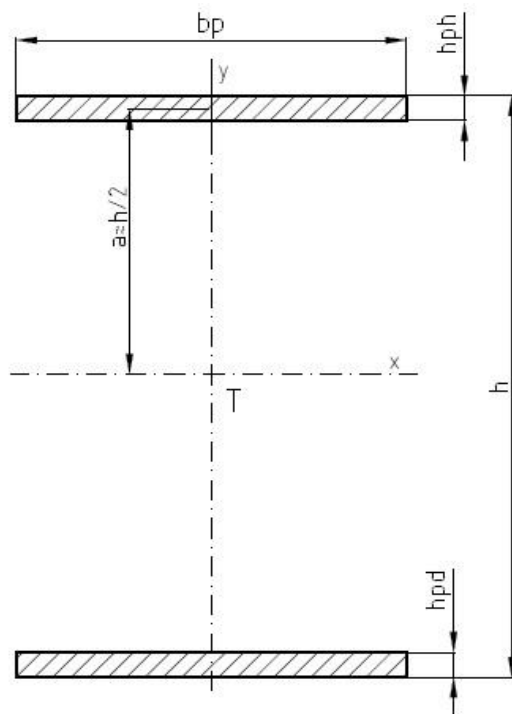
zvoleno $b_s = 8 \text{ mm}$

Kde:

$h = h_s = 750 \text{ mm}$, dle rovnice (3.4)

Minimální výška pásnice

Z předpokladu že minimální kvadratický moment průřezu je rozložen mezi spodní a horní pásnici, byl vyjádřen vztah pro minimální výšku pásnice. Vyjádřeno pomocí portálu wolframalpha.com.



Obr. 6 Schéma pro výpočet pásnice [vlastní práce]

$$h_{pmin} = \frac{\sqrt[3]{\sqrt{b_p^6 \cdot h^6 - 9 \cdot b_p^4 + 3 \cdot I_{xmin} \cdot b_p^2}}}{b_p} - \frac{b_p h^2}{\sqrt[3]{\sqrt{b_p^6 h^6 - 9 b_p^4 + 3 I_{xmin} \cdot b_p^2}}} \quad (3.7)$$

$$h_{pmin} = \frac{\sqrt[3]{\sqrt{380^6 \cdot 750^6 - 9 \cdot 380^4 + 3 \cdot 7,63 \cdot 10^8 \cdot 380^2}}}{380} + \frac{380 \cdot 750^2}{\sqrt[3]{\sqrt{380^6 \cdot 750^6 - 9 \cdot 380^4 + 3 \cdot 7,63 \cdot 10^8 \cdot 380^2}}}$$

$$h_{pmin} = 7,09 \text{ mm}$$

Kde:

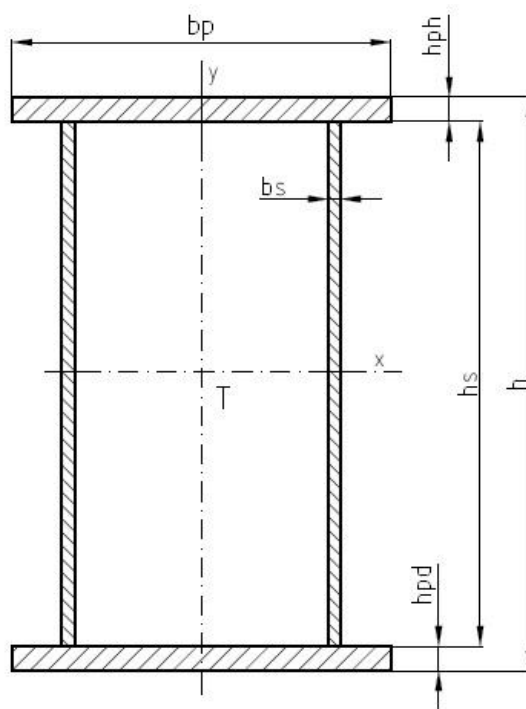
$h = 750 \text{ mm}$, dle rovnice (3.4)

$b_p = 380 \text{ mm}$, dle rovnice (3.5)

$I_{xmin} = 7,628 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$, dle rovnice (3.3)

3.4. Zvolené rozměry nosníku

Rozměry byly voleny tak, aby vyhovovaly zatížení nosníku. Konkrétně výška dolní pásnice musela být kvůli lokálnímu ohybovému zatížení příruby (viz. kapitola 4.3.2.) od kol pojezdějící kočky zvolena podstatně větší, než je teoretický návrh z výše uvedených vztahů.



Obr. 7 Průřez skříňového nosníku [vlastní práce]

Výška nosníku: $h = 750 \text{ mm}$
 Výška stojiny: $h_s = 715 \text{ mm}$
 Šířka stojiny: $b_s = 8 \text{ mm}$
 Šířka pásnic: $b_p = 380 \text{ mm}$
 Výška horní pásnice: $h_{ph} = 10 \text{ mm}$
 Výška dolní pásnice: $h_{pd} = 25 \text{ mm}$
 Vzdálenost těžiště k dolnímu krajnímu vláknu: $e_{1t} = 296,1 \text{ mm}$
 Vzdálenost těžiště k hornímu krajnímu vláknu: $e_{1p} = 453,9 \text{ mm}$

3.5. Skutečný kvadratický moment průřezu

Vzhledem k rozdílnosti spodní a horní pásnice se těžiště posunulo blíže k dolní pásnici. K tomuto novému těžišti byl vypočítán skutečný kvadratický moment průřezu k ose x dle obr. 7.

$$I_{xskut} = \left[\left(\frac{b_p \cdot h_{ph}^3}{12} \right) + b_p \cdot h_{ph} \cdot \left(e_{1p} - \frac{h_{ph}}{2} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{b_p \cdot h_{pd}^3}{12} \right) + b_p \cdot h_{pd} \cdot \left(e_{1t} - h_{pd} \right)^2 \right] + 2 \cdot \left(\frac{b_s h_s^3}{12} + b_s h_s e_s^2 \right) \quad (3.8)$$

$$I_{xskut} = \left[\left(\frac{380 \cdot 10^3}{12} \right) + 380 \cdot 10 \cdot \left(453,9 - \frac{10}{2} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{380 \cdot 25^3}{12} \right) + 380 \cdot 25 \cdot (296,1 - 25)^2 \right] + 2 \cdot \left(\frac{8 \cdot 715^3}{12} + 8 \cdot 715 \cdot 86,4^2 \right)$$

$$I_{xskut} = 2,037 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Kde:

$h = 750 \text{ mm}$
 $h_s = 715 \text{ mm}$
 $b_s = 8 \text{ mm}$
 $b_p = 380 \text{ mm}$
 $h_{ph} = 10 \text{ mm}$
 $h_{pd} = 25 \text{ mm}$
 $e_{1t} = 296,1 \text{ mm}$
 $e_{1p} = 453,9 \text{ mm}$
 $e_s = 86,4 \text{ mm}$

3.6. Hmotnost nosníku

K hmotnosti je započítána i přibližná hmotnost ostatního příslušenství nosníku, jako je kabeláž nebo příčné výztuhy.

$$m_n = V_n \cdot \rho_o + 100 \quad (3.9)$$

$$m_n = 0,297 \cdot 7850 + 100$$

$$m_n = 2,431 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

Kde:

$$V_n = 0,297 \text{ m}^3, \text{ dle rovnice (3.11)}$$

$$\rho_o = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$$

Doplňující výpočty k rovnici (3.9):

Plocha průřezu nosníku

$$S = b_p \cdot h_{ph} + b_p \cdot h_{pd} + 2 \cdot h_s \cdot b_s \quad (3.10)$$

$$S = 380 \cdot 10 + 380 \cdot 25 + 2 \cdot 715 \cdot 8$$

$$S = 2,474 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Kde:

$$h_s = 715 \text{ mm}$$

$$b_s = 8 \text{ mm}$$

$$b_p = 380 \text{ mm}$$

$$h_{ph} = 10 \text{ mm}$$

$$h_{pd} = 25 \text{ mm}$$

Objem nosníku

$$V_n = S \cdot L \cdot 10^{-9} \quad (3.11)$$

$$V_n = 2,474 \cdot 10^4 \cdot 12000 \cdot 10^{-9}$$

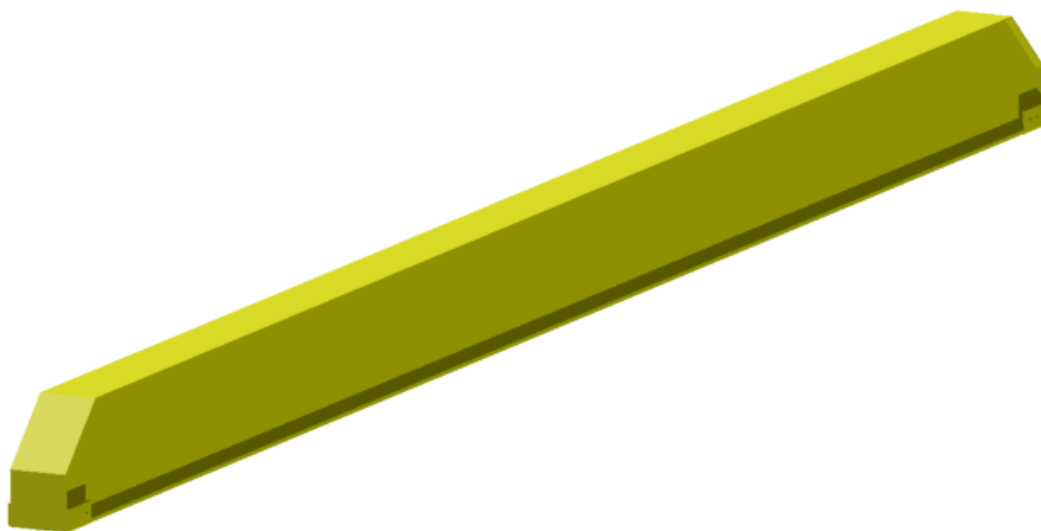
$$V_n = 0,297 \text{ m}^3$$

Kde:

$$S = 2,474 \cdot 10^4 \text{ mm}^2, \text{ dle rovnice (3.10)}$$

$$L = 12000 \text{ mm}, \text{ dle zadání}$$

4. PEVNOSTNÍ VÝPOČET HLAVNÍHO NOSNÍKU



Obr. 8 Hlavní nosník [vlastní práce]

4.1. Kontrola nosníku na průhyb

Celkový maximální průhyb se skládá z průhybu od hmotnosti kočky s břemenem a z průhybu od vlastní hmotnosti nosníku. Celkový průhyb musí být menší než dovolený průhyb.

Dovolený průhyb dle [6], str. 606

$$f_d = \frac{L}{500} \quad (4.1)$$

$$f_d = \frac{12000}{500}$$

$$f_d = 24 \text{ mm}$$

Kde:

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

Průhyb od hmotnosti kočky s břemenem dle [6], str. 616

$$f_b = \frac{(K_1 + K_2) \cdot (L - a_k) \cdot [3 \cdot L^2 - (L - a_k)^2]}{96 \cdot E \cdot I_{xskut}} \quad (4.2)$$

$$f_b = \frac{(34129,971 + 73632,9) \cdot (12000 - 940) \cdot [3 \cdot 12000^2 - (12000 - 940)^2]}{96 \cdot 210000 \cdot 2,037 \cdot 10^9}$$

$$f_b = 8,987 \text{ mm}$$

Kde:

$$K_1 = 34129,971 \text{ N, dle rovnice (3.2)}$$

$$K_2 = 73632,9 \text{ N, dle rovnice (3.1)}$$

$$L = 12000 \text{ mm, dle zadání}$$

$$a_k = 940 \text{ mm, dle [5]}$$

$$I_{xskut} = 2,037 \cdot 10^9 \text{ mm}^4, \text{ dle rovnice (3.8)}$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

Průhyb od vlastní hmotnosti dle [9], str. 45

$$f_{mn} = \frac{g \cdot L^4 \cdot 5 \cdot \frac{m_n}{L}}{384 \cdot E \cdot I_{xskut}} \quad (4.3)$$

$$f_{mn} = \frac{9,81 \cdot 12000^4 \cdot 5 \cdot \frac{2,431 \cdot 10^3}{12000}}{384 \cdot 210000 \cdot 2,037 \cdot 10^9}$$

$$f_{mn} = 1,254 \text{ mm}$$

Kde:

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$L = 12000 \text{ mm, dle zadání}$$

$$m_n = 2,431 \cdot 10^3 \text{ kg, dle rovnice (3.9)}$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$I_{xskut} = 2,037 \cdot 10^9 \text{ mm}^4, \text{ dle rovnice (3.8)}$$

Celkový průhyb

$$f_c = f_b + f_{mn} \quad (4.4)$$

$$f_c = 8,987 + 1,254$$

$$f_c = 10,241 \text{ mm}$$

$$f_c < f_d \quad (4.5)$$

$$10,241 < 24 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$$f_b = 8,987 \text{ mm, dle rovnice (4.2)}$$

$$f_{mn} = 1,254 \text{ mm, dle rovnice (4.3)}$$

$$f_d = 24 \text{ mm, dle rovnice (4.1)}$$

4.2. Vnitřní silové účinky

4.2.1. Svislé vnitřní silové účinky

Výpočet vnitřních silových účinků od svislého zatížení, tj. od zatížení kočky s břemenem a vlastní tíhy nosníku, byl řešen pro nejnepříznivější situace. Tedy pro polohu kočky s břemenem uprostřed hlavního nosníku a pro polohu v minimální vzdálenosti od příčnicku.

Výpis dynamických a bezpečnostních součinitelů

$$\phi_1 = 1,1, \text{ dle [10], str. 13}$$

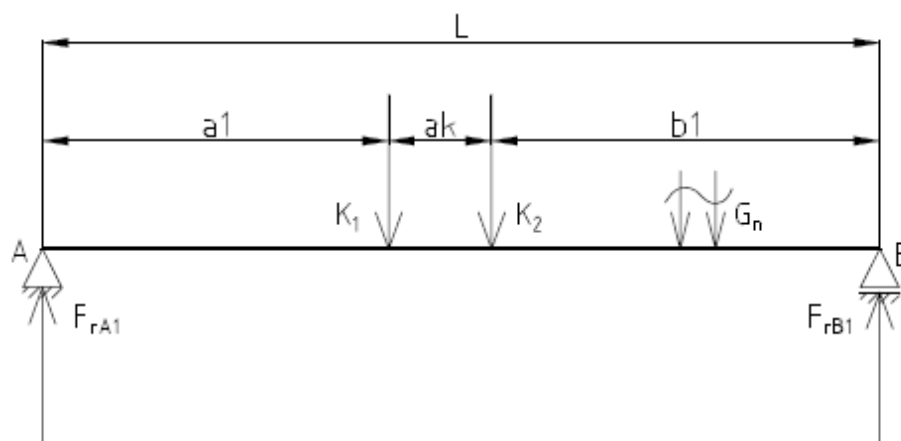
$$\phi_2 = 1,16, \text{ dle [10], str. 13}$$

$$\gamma_{p1} = 1,22, \text{ dle [10], str. 29}$$

$$\gamma_{p2} = 1,34, \text{ dle [10], str. 31}$$

Reakce v podporách, když je kladkostroj s břemenem uprostřed nosníku

Výpočet je proveden z momentové rovnováhy. Hodnoty reakcí jsou ovlivněny násobícími dynamickými součiniteli a součiniteli bezpečnosti.



Obr. 9 Schéma nosníku – břemeno uprostřed [vlastní práce]

$$F_{rA1} = \frac{[K_1 \cdot (a_k + b_1) + K_2 \cdot b_1] \cdot \phi_2 \cdot \gamma_{p2}}{L} + \frac{m_n}{2} \cdot g \cdot L \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1} \quad (4.6)$$

$$F_{rA1} = \frac{[34129,971 \cdot (940 + 5710) + 73632,9 \cdot 5710] \cdot 1,16 \cdot 1,34}{12000} + \frac{2,430508 \cdot 10^3}{\frac{12000}{2}} \cdot 9,81 \cdot 12000 \cdot 1,1 \cdot 1,22$$

$$F_{rA1} = 9,986 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$F_{rB1} = \frac{[K_1 \cdot a_1 + K_2 \cdot (a_k + a_1)] \cdot \phi_2 \cdot \gamma_{p2}}{L} + \frac{m_n}{2} \cdot g \cdot L \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1} \quad (4.7)$$

$$F_{rB1} = \frac{[34129,971 \cdot 5350 + 73632,9 \cdot (940 + 5350)] \cdot 1,16 \cdot 1,34}{12000} + \frac{2,430508 \cdot 10^3}{\frac{12000}{2}} \cdot 9,81 \cdot 12000 \cdot 1,1 \cdot 1,22$$

$$F_{rB1} = 9,964 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Kde:

$a_1 = 5350 \text{ mm}$, dle obr. 9

$b_1 = 5710 \text{ mm}$, dle obr. 9

$K_1 = 34129,971 \text{ N}$, dle rovnice (3.2)

$K_2 = 73632,9 \text{ N}$, dle rovnice (3.1)

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

$a_k = 940 \text{ mm}$, dle [5]

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

$m_n = 2,431 \cdot 10^3 \text{ kg}$, dle rovnice (3.9)

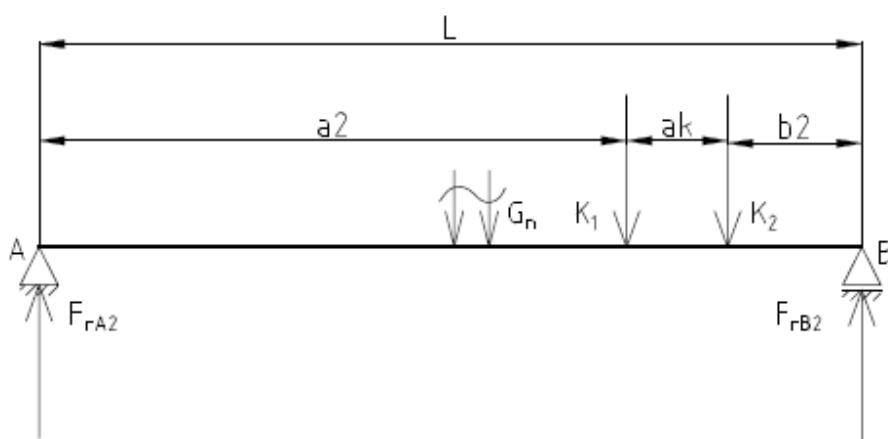
$\phi_1 = 1,1$, dle [10], str. 13

$\phi_2 = 1,16$, dle [10], str. 13

$\gamma_{p1} = 1,22$, dle [10], str. 29

$\gamma_{p2} = 1,34$, dle [10], str. 31

Reakce v podporách, když je kladkostroj s břemenem nejblíže podpoře



Obr. 10 Schéma nosníku – břemeno nejblíže podpoře [vlastní práce]

$$F_{rA2} = \frac{[K_1 \cdot (a_k + b_2) + K_2 \cdot b_2] \cdot \phi_2 \cdot \gamma_{p2}}{L} + \frac{\frac{m_n}{L}}{2} \cdot g \cdot L \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1} \quad (4.8)$$

$$F_{rA2} = \frac{[34129,971 \cdot (940 + 450) + 73632,9 \cdot 450] \cdot 1,16 \cdot 1,34}{12000} + \frac{\frac{2,431 \cdot 10^3}{12000}}{2} \cdot 9,81 \cdot 12000 \cdot 1,1 \cdot 1,22$$

$$F_{rA2} = 2,644 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$F_{rB2} = \frac{[K_1 \cdot a_2 + K_2 \cdot (a_k + a_2)] \cdot \phi_2 \cdot \gamma_{p2}}{L} + \frac{\frac{m_n}{L}}{2} \cdot g \cdot L \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1} \quad (4.9)$$

$$F_{rB2} = \frac{[34129,971 \cdot 10610 + 73632,9 \cdot (940 + 10610)] \cdot 1,16 \cdot 1,34}{12000} + \frac{\frac{2,430508 \cdot 10^3}{12000}}{2} \cdot 9,81 \cdot 12000 \cdot 1,1 \cdot 1,22$$

$$F_{rB2} = 1,731 \cdot 10^5 \text{ N}$$

Kde:

$a_2 = 10610 \text{ mm}$, dle obr. 10

$b_2 = 450 \text{ mm}$, dle obr. 10

$K_1 = 34129,971 \text{ N}$, dle rovnice (3.2)

$K_2 = 73632,9 \text{ N}$, dle rovnice (3.1)

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

$a_k = 940 \text{ mm}$, dle [5]

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$m_n = 2,431 \cdot 10^3 \text{ kg}$, dle rovnice (3.9)

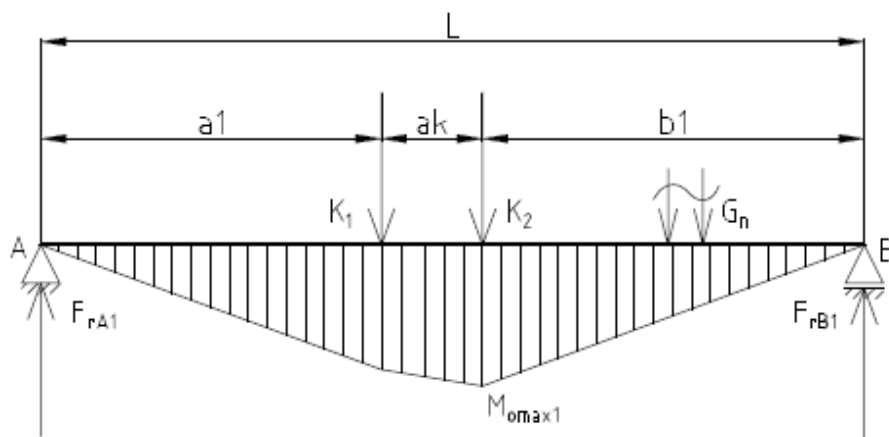
$\phi_1 = 1,1$, dle [10], str. 13

$\phi_2 = 1,16$, dle [10], str. 13

$\gamma_{p1} = 1,22$, dle [10], str. 29

$\gamma_{p2} = 1,34$, dle [10], str. 31

Výpočet maximálního ohybového momentu způsobeného kladkostrojem s břemenem a vlastní hmotností



Obr. 11 Maximální svislý ohybový moment na nosník [vlastní práce]

$$M_{omax1} = F_{rB1} \cdot b_1 \quad (4.10)$$

$$M_{omax1} = 9,964 \cdot 10^4 \cdot 5710$$

$$M_{omax1} = 5,69 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

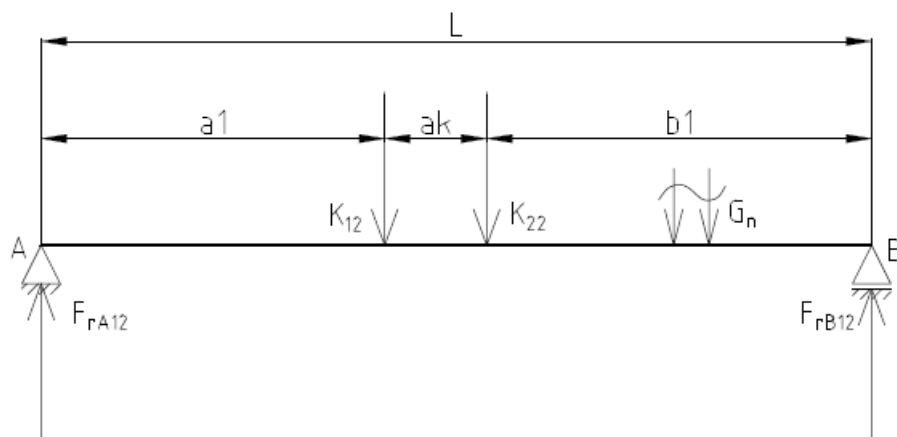
Kde:

$$F_{rB1} = 9,964 \cdot 10^4 \text{ N}, \text{ dle rovnice (4.7)}$$

$b_1 = 5710 \text{ mm}$, dle obr. 9

Reakce v podporách, když je kladkostroj bez břemene uprostřed hlavního nosníku

Nejdříve bylo potřeba stanovit zatížení pod koly kočky podle poměru rozložení hmotnosti kočky na dvojice kol dle katalogu výrobce.[5]



Obr. 12 Schéma nosníku – kočka bez břemene uprostřed [vlastní práce]

$$K_{12} = 0,4 \cdot m_k \cdot g \quad (4.11)$$

$$K_{12} = 0,4 \cdot 985 \cdot 9,81$$

$$K_{12} = 3870 \text{ N}$$

$$K_{22} = 0,6 \cdot m_k \cdot g \quad (4.12)$$

$$K_{22} = 0,6 \cdot 985 \cdot 9,81$$

$$K_{22} = 5800 \text{ N}$$

Kde:

$m_k = 985 \text{ kg}$, dle [5]

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$$F_{rA12} = \frac{[K_{12} \cdot (a_k + b_1) + K_{22} \cdot b_1] \cdot \phi_2 \cdot \gamma_{p2}}{L} + \frac{\frac{m_n}{L}}{2} \cdot g \cdot L \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1} \quad (4.13)$$

$$F_{rA12} = \frac{[3870 \cdot (940 + 5710) + 5800 \cdot 5710] \cdot 1,16 \cdot 1,22}{12000 \cdot 1,1 \cdot 1,34} + \frac{\frac{2,431 \cdot 10^3}{12000}}{2} \cdot 9,81$$

$$F_{rA12} = 2,451 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$F_{rB12} = \frac{[K_{12} \cdot a_1 + K_{22} \cdot (a_k + a_1)] \cdot \phi_2 \cdot \gamma_{p2}}{L} + \frac{\frac{m_n}{L}}{2} \cdot g \cdot L \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1} \quad (4.14)$$

$$F_{rB12} = \frac{[3870 \cdot 5350 + 5800 \cdot (940 + 5350)] \cdot 1,16 \cdot 1,22}{12000 \cdot 1,1 \cdot 1,34} + \frac{\frac{2,431 \cdot 10^3}{12000}}{2} \cdot 9,81$$

$$F_{rB12} = 2,431 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Kde:

$a_1 = 5350 \text{ mm}$, dle obr. 12

$b_1 = 5710 \text{ mm}$, dle obr. 12

$K_{12} = 3,86514 \cdot 10^3 \text{ N}$, dle rovnice (4.11)

$K_{22} = 5,79771 \cdot 10^3 \text{ N}$, dle rovnice (4.12)

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

$a_k = 940 \text{ mm}$, dle [5]

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$m_n = 2,431 \cdot 10^3 \text{ kg}$, dle rovnice (3.9)

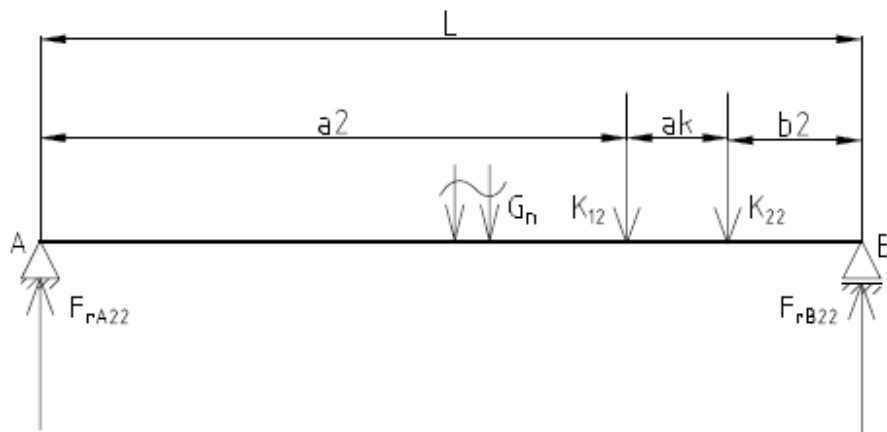
$\phi_1 = 1,1$, dle [10], str. 13

$\phi_2 = 1,16$, dle [10], str. 13

$\gamma_{p1} = 1,22$, dle [10], str. 29

$\gamma_{p2} = 1,34$, dle [10], str. 31

Reakce v podporách, když je kladkostroj bez břemene nejblíže podpoře



Obr. 13 Schéma nosníku – kočka bez břemene nejblíže podpoře [vlastní práce]

$$F_{rA22} = \frac{[K_{12} \cdot (a_k + b_2) + K_{22} \cdot b_2] \cdot \phi_2 \cdot \gamma_{p2}}{L} + \frac{\frac{m_n}{L}}{2} \cdot g \cdot L \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1} \quad (4.15)$$

$$F_{rA22} = \frac{[3870 \cdot (940 + 450) + 5800 \cdot 450] \cdot 1,16 \cdot 1,22}{12000 \cdot 1,1 \cdot 1,34} + \frac{\frac{2,431 \cdot 10^3}{12000}}{2} \cdot 9,81 \cdot 12000$$

$$F_{rA22} = 1,851 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$F_{rB22} = \frac{[K_{12} \cdot a_2 + K_{22} \cdot (a_k + a_2)] \cdot \phi_2 \cdot \gamma_{p2}}{L} + \frac{\frac{m_n}{L}}{2} \cdot g \cdot L \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1} \quad (4.16)$$

$$F_{rB22} = \frac{[3870 \cdot 10610 + 5800 \cdot (940 + 10610)] \cdot 1,16 \cdot 1,22}{12000 \cdot 1,1 \cdot 1,34} + \frac{\frac{2,431 \cdot 10^3}{12000}}{2} \cdot 9,81$$

$$F_{rB22} = 3,031 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Kde:

$a_2 = 10610 \text{ mm}$, dle obr. 13

$b_2 = 450 \text{ mm}$, dle obr. 13

$K_{12} = 3,86514 \cdot 10^3 \text{ N}$, dle rovnice (4.11)

$K_{22} = 5,79771 \cdot 10^3 \text{ N}$, dle rovnice (4.12)

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

$a_k = 940 \text{ mm}$, dle [5]

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$m_n = 2,431 \cdot 10^3 \text{ kg}$, dle rovnice (3.9)

$\phi_1 = 1,1$, dle [10], str. 13

$\phi_2 = 1,16$, dle [10], str. 13

$\gamma_{p1} = 1,22$, dle [10], str. 29

$\gamma_{p2} = 1,34$, dle [10], str. 31

Výpočet maximálního ohybového momentu od kladkostroje a tíhy nosníku

$$M_{omaxk} = F_{rB12} \cdot b_1 \quad (4.17)$$

$$M_{omaxk} = 2,431 \cdot 10^4 \cdot 5710$$

$$M_{omaxk} = 1,388 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

Kde:

$F_{rB12} = 2,431 \cdot 10^4 \text{ N}$, dle rovnice (4.14)

$b_1 = 5710 \text{ mm}$, dle obr. 12

4.2.2. Vodorovné silové účinky

Tyto silové účinky jsou způsobeny hlavně setrvačnými silami a bočními rázy. Případně od bočního tlaku od zatížení větrem při venkovním provozu.

Brzdná síla, dle [6], str. 604

$$H_b = \frac{1}{14} \cdot (G_b + m_k) \cdot g \quad (4.18)$$

$$H_b = \frac{1}{14} \cdot (10000 + 985) \cdot 9,81$$

$$H_b = 7,7 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Kde:

$G_b = 10000 \text{ kg}$, dle zadání

$m_k = 985 \text{ kg}$, dle [5]

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Celkový ohybový moment ve vodorovné rovině

Jelikož se tento moment skládá podle empirického vztahu dle [6], str. 605 z momentu od vlastní hmotnosti a z momentu od hmotnosti břemene, je nutné moment způsobený vlivem vlastní hmotnosti od celkového odečíst, protože ten jej již ve své velikosti obsahuje.

$$M_b = \frac{1}{14} \cdot (M_g + M_{omax1} - M_g) \quad (4.19)$$

$$M_b = \frac{1}{14} \cdot (3,58 \cdot 10^7 + 5,69 \cdot 10^8 - 3,58 \cdot 10^7) \cdot 10^{-3}$$

$$M_b = 2,45 \cdot 10^4 \text{ Nmm}$$

Kde:

$$M_g = 3,576 \cdot 10^7 \text{ Nmm}, \text{ dle rovnice (4.20)}$$

$$M_{omax1} = 5,69 \cdot 10^8 \text{ Nmm}, \text{ dle rovnice (4.10)}$$

Doplňující výpočet k rovnici (4.19):

Moment od vlastní hmotnosti nosníku

$$M_g = \frac{\frac{m_n}{L} \cdot g \cdot L^2}{8} \quad (4.20)$$

$$M_g = \frac{\frac{2,431 \cdot 10^3}{12000} \cdot 9,81 \cdot 12000^2}{8}$$

$$M_g = 3,576 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

Kde:

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$L = 12000 \text{ mm}, \text{ dle zadání}$$

$$m_n = 2,431 \cdot 10^3 \text{ kg}, \text{ dle rovnice (3.9)}$$

Vodorovné boční rázy

Pro jeřáby, které pojíždí rychlostí menší než 1 m/s, se pro určení velikosti bočního rázu vynásobí příslušný tlak kola součinitelem $\varepsilon = 0,1$ (součinitel bočních rázů).[6], str. 605

$$M_\varepsilon = \varepsilon \cdot M_{omax1} \quad (4.21)$$

$$M_\varepsilon = 0,1 \cdot 5,69 \cdot 10^8 = 3,073 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

Kde:

$$\varepsilon = 0,1, \text{ dle [6], str. 51}$$

$$M_{omax1} = 5,69 \cdot 10^8 \text{ Nmm}, \text{ dle rovnice (4.10)}$$

4.3. Posouzení únosnosti hlavního nosníku

4.3.1. Posouzení statické únosnosti hlavního nosníku

Účelem je zabránit možnému vzniku nadměrných deformací na mezi kluzu materiálu. Pro výpočet návrhových napětí bylo nejdříve nutné vypočítat průřezové moduly k osám x a y . Ve výpočtu jsou zahrnuty dříve uvedené dynamické součinitele.

Modul průřezu v ohybu v ose x - tlak

$$W_{ox1} = \frac{I_{xskut}}{e_{1p}} \quad (4.22)$$

$$W_{ox1} = \frac{2,037 \cdot 10^9}{453,9}$$

$$W_{ox1} = 4,488 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Kde:

$$I_{xskut} = 2,037 \cdot 10^9 \text{ mm}^4, \text{ dle rovnice (3.8)}$$

$$e_{1p} = 453,9 \text{ mm}, \text{ z kap. 3.4.}$$

Modul průřezu v ohybu v ose x - tah

$$W_{ox2} = \frac{I_{xskut}}{e_{1t}} \quad (4.23)$$

$$W_{ox2} = \frac{2,037 \cdot 10^9}{296,1}$$

$$W_{ox2} = 6,88 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Kde:

$$I_{xskut} = 2,037 \cdot 10^9 \text{ mm}^4, \text{ dle rovnice (3.8)}$$

$$e_{1t} = 296,1 \text{ mm}, \text{ z kap. 3.4.}$$

Modul průřezu v ohybu v ose y

$$W_{oy} = \frac{I_{yskut}}{e_2} \quad (4.24)$$

$$W_{oy} = \frac{1,969 \cdot 10^8}{135}$$

$$W_{oy} = 1,459 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Kde:

$$I_{yskut} = 1,97 \cdot 10^8 \text{ mm}^4, \text{ dle rovnice (4.25)}$$

$$e_2 = 135 \text{ mm}, \text{ dle kap. 3.4.}$$

Doplňující výpočet k rovnici (4.24):

Kvadratický moment průřezu k ose y

$$I_{yskut} = 2 \cdot \left[\left(\frac{h_s \cdot b_s^3}{12} \right) + b_s \cdot h_s \cdot \left(e_2 - \frac{b_s}{2} \right)^2 \right] + \frac{b_p \cdot h_{pd}^3}{12} + \frac{b_p \cdot h_{ph}^3}{12} \quad (4.25)$$

$$I_{yskut} = 2 \cdot \left[\left(\frac{715 \cdot 8^3}{12} \right) + 8 \cdot 715 \cdot \left(135 - \frac{8}{2} \right)^2 \right] + \frac{380 \cdot 25^3}{12} + \frac{380 \cdot 25^3}{12}$$

$$I_{yskut} = 1,97 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Kde: (z kap. 4.3.)

$$e_2 = 135 \text{ mm}$$

$$h = 750 \text{ mm}$$

$$h_s = 715 \text{ mm}$$

$$b_s = 8 \text{ mm}$$

$$b_p = 380 \text{ mm}$$

$$h_{ph} = 10 \text{ mm}$$

$$h_{pd} = 25 \text{ mm}$$

Návrhové ohybové napětí v ose x - tlak

$$\sigma_{opx} = \frac{M_{omax1}}{W_{ox1}} \quad (4.26)$$

$$\sigma_{opx} = \frac{5,69 \cdot 10^8}{4,488 \cdot 10^6}$$

$$\sigma_{opx} = 126,77 \text{ MPa}$$

Kde:

$$M_{omax1} = 5,69 \cdot 10^8 \text{ Nmm},$$

$$W_{ox1} = 4,488 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Návrhové ohybové napětí v ose x - tah

$$\sigma_{otx} = \frac{M_{omax1}}{W_{ox2}} \quad (4.27)$$

$$\sigma_{otx} = \frac{5,69 \cdot 10^8}{6,88 \cdot 10^6}$$

$$\sigma_{otx} = 82,7 \text{ MPa}$$

Kde:

$$M_{omax1} = 5,69 \cdot 10^8 \text{ Nmm}, \text{ dle rovnice (4.10)}$$

$$W_{ox2} = 6,88 \cdot 10^6 \text{ mm}^3, \text{ dle rovnice (4.23)}$$

Návrhové ohybové napětí v ose y

Pro výpočet byl použit maximální ohybový moment v této ose.

$$\sigma_{ony} = \frac{M_{\varepsilon}}{W_{oy}} \quad (4.28)$$

$$\sigma_{ony} = \frac{3,073 \cdot 10^7}{1,46 \cdot 10^6}$$

$$\sigma_{ony} = 21,1 \text{ MPa}$$

Kde:

$$M_{\varepsilon} = 3,073 \cdot 10^7 \text{ Nmm, dle rovnice (4.21)}$$

$$W_{oy} = 1,46 \cdot 10^6 \text{ mm}^3, \text{ dle rovnice (4.24)}$$

Statická únosnost – posouzení

Pro svoji zanedbatelnou velikost nebylo zahrnuto do výpočtu smykové napětí v průřezu hlavního nosníku. Posouzení bylo provedeno dle [11], str. 33.

$$stat_N = \left(\frac{\sigma_{opx}}{\sigma_{dov}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ony}}{\sigma_{dov}} \right)^2 - \frac{\sigma_{ony} \cdot \sigma_{opx}}{\sigma_{dov} \cdot \sigma_{dov}} \quad (4.29)$$

$$stat_N = \left(\frac{126,77}{205} \right)^2 + \left(\frac{21,1}{205} \right)^2 - \frac{21,1 \cdot 126,77}{205 \cdot 205}$$

$$stat_N = 0,33$$

$$stat_N \leq 1 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$$\sigma_{opx} = 126,77 \text{ MPa, dle rovnice (4.26)}$$

$$\sigma_{ony} = 21,1 \text{ MPa, dle rovnice (4.28)}$$

$$\sigma_{dov} = 205 \text{ MPa, dle [6], str. 27}$$

4.3.2. Posouzení únavové pevnosti hlavního nosníku

Výpočet byl proveden u nosných prvků, které jsou zatíženy více než $2 \cdot 10^4$ cykly po dobu technického života. Během výpočtu tohoto prokázání únavové pevnosti byly zohledněny vrubové skupiny konstrukčních prvků a provozní skupina jeřábu.[12]

a) Únavová pevnost horní pásnice

Nejdříve bylo nutné určit maximální a minimální tlakové napětí, kterým je horní pásnice namáhána při ohybu.

Maximální tlakové napětí

$$\sigma_{pmax} = -\sigma_{opx} \quad (4.30)$$

$$\sigma_{pmax} = -126,767 \text{ MPa}$$

Kde:

$$\sigma_{opx} = 126,77 \text{ MPa, dle rovnice (4.26)}$$

Minimální tlakové napětí

$$\sigma_{pmin} = \frac{-M_{omaxk}}{W_{ox1}} \quad (4.31)$$

$$\sigma_{pmin} = \frac{-1,39 \cdot 10^4}{4,49 \cdot 10^6}$$

$$\sigma_{pmin} = -30,93 \text{ MPa}$$

Kde:

$$M_{omaxk} = 1,39 \cdot 10^4 \text{ Nmm, dle rovnice (4.17)}$$

$$W_{ox1} = 4,49 \cdot 10^6 \text{ mm}^3, \text{ dle rovnice (4.22)}$$

Při stanovení výpočtové únavové pevnosti se postupovalo dle [12], tab. 17, str. 29. Byla zohledněna vrubová skupina konstrukčního prvku dle [12], tab. 19, str. 31. Základní výpočtová únavová pevnost vycházející z odvozené provozní a vrubové skupiny je $R_{fat_1} = 169,7 \text{ MPa}$ dle [12], tab. 14, str. 27. Pro výpočet bylo nutné určit poměr mezních napětí a dále postupovat dle [12], str. 29.

Poměr mezních napětí

$$\chi = \frac{\sigma_{pmin}}{\sigma_{pmax}} \quad (4.32)$$

$$\chi = \frac{-30,93}{-126,77}$$

$$\chi = 0,244$$

Kde:

$$\sigma_{pmin} = 30,93 \text{ MPa, dle rovnice (4.31)}$$

$$\sigma_{pmax} = 126,77 \text{ MPa, dle rovnice (4.30)}$$

$$R_{fatp0} = 2 \cdot R_{fat_1} \quad (4.33)$$

$$R_{fatp0} = 2 \cdot 169,7$$

$$R_{fatp0} = 339,4 \text{ MPa}$$

Kde:

$$R_{fat_1} = 169,7 \text{ MPa, dle [12], tab. 14, str. 27}$$

$$R_{fatp\chi} = \frac{R_{fatp0}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fatp0}}{0,9 \cdot f_u}\right) \cdot \chi} \quad (4.34)$$

$$R_{fatp\chi} = \frac{339,4}{1 - \left(1 - \frac{339,4}{0,9 \cdot 340}\right) \cdot 0,244}$$

$$R_{fatp\chi} = 330,6 \text{ MPa}$$

Dle [12], tab. 15, str. 28 je maximální dovolená hodnota pro ocel řady 37 $R_{fatp\chi} = 180 \text{ MPa}$.

$$R_{fatp\chi} \geq |\sigma_{pmax}| \quad (4.35)$$

$$180 \geq 126,77 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$$f_u = 340 \text{ MPa}, [6], \text{ str. 27}$$

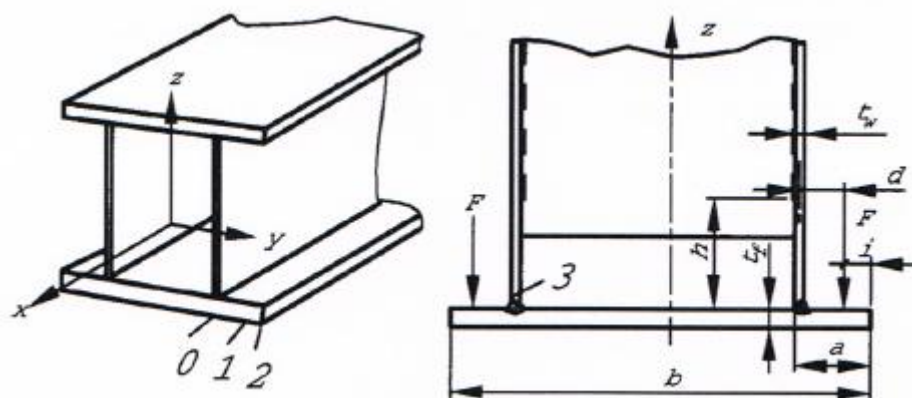
$$R_{fatp0} = 339,4 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (4.33)}$$

$$\chi = 0,244, \text{ dle rovnice (4.32)}$$

b) Únavová pevnost dolní pásnice

Kvůli zatížení od kol kladkostroje na okraj příruby na spodní pásnici, zde působí kromě globálního tahového napětí od ohybu celého nosníku i lokální ohybové namáhání na okraji příruby.

Toto lokální namáhání vzniká pod silou F_{oL} a při výpočtu se vycházelo z postupu dle [13], str. 66 - 67 pro skříňový nosník.



Obr. 14 Lokální ohyb příruby [13], str. 66

Maximální síla pod kolem kočky (v obr. 14, $F \equiv F_{oL}$)

$$F_{oL} = \frac{K_2 \cdot \Phi_2 \cdot \gamma_{p1}}{2} \quad (4.36)$$

$$F_{oL} = \frac{73632,9 \cdot 1,16 \cdot 1,22}{2}$$

$$F_{oL} = 5,21 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Kde:

$$K_2 = 73632,9 \text{ N, dle rovnice (3.1)}$$

$$\emptyset_2 = 1,16, \text{ dle [10], str. 13}$$

$$\gamma_{p1} = 1,22, \text{ dle [10], str. 29}$$

Součinitel k výpočtu lokálního ohybového napětí dle [13], str. 66

$$\lambda_1 = \frac{i}{a - t_w} \quad (4.37)$$

$$\lambda_1 = \frac{18,75}{63 - 8}$$

$$\lambda_1 = 0,341$$

Kde:

$$i = 18,75, \text{ dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

$$a = 63 \text{ mm, dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

$$t_w = b_s = 8 \text{ mm, dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

Poměr šířky stojiny a příruby dle [13], str. 67

$$r_t = \frac{t_w}{t_f} \quad (4.38)$$

$$r_t = \frac{8}{25}$$

$$r_t = 0,32$$

Kde:

$$t_f = h_{pd} = 25 \text{ mm, dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

$$t_w = b_s = 8 \text{ mm, dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

Součinitel pro okraj příruby

Hodnota součinitele dle [13], str. 67 vychází z řešení podobných situací u skříňových nosníků metodou konečných prvků.

$$c_{x2} = -0,95 + \frac{2,7}{(2 \cdot \lambda_1 + 0,5)^{0,333}} + [1,2 \cdot (\lambda_1 - 0,1)^{0,25} - 0,76] \cdot \left(\frac{0,2}{r_t}\right)^4 \quad (4.39)$$

$$c_{x2} = -0,95 + \frac{2,7}{(2 \cdot 0,341 + 0,5)^{0,320,333}} + [1,2 \cdot (0,341 - 0,1)^{0,25} - 0,76] \cdot \left(\frac{0,2}{0,32}\right)^4$$

$$c_{x2} = 1,471$$

Kde:

$r_t = 0,32$, dle rovnice (4.38)

$\lambda_1 = 0,341$, dle rovnice (4.37)

Lokální ohybové napětí dle [13], str. 67

$$\sigma_{x2} = c_{x2} \cdot \frac{F_{oL}}{t_f^2} \quad (4.40)$$

$$\sigma_{x2} = 1,471 \cdot \frac{5,21 \cdot 10^4}{25^2}$$

$$\sigma_{x2} = 122,6 \text{ MPa}$$

Kde:

$c_{x2} = 1,471$, dle rovnice (4.39)

$F_{oL} = 5,21 \cdot 10^4 \text{ N}$, dle rovnice (4.36)

$t_f = h_{pd} = 25 \text{ mm}$, dle konstrukce nosníku, obr. 14

Stejně jako u horní pásnice bylo nutné určit maximální a minimální napětí v krajním vláknu dolní pásnice.

Maximální tahové napětí v dolní pásnici

Maximální napětí je kombinací (součtem) globálního a lokálního napětí, přičemž se lokální napětí vynásobí číslem 0,75 dle [13].

$$\sigma_{tmax} = \sigma_{otx} + 0,75 \cdot \sigma_{x2} \quad (4.41)$$

$$\sigma_{tmax} = 82,7 + 0,75 \cdot 122,6$$

$$\sigma_{tmax} = 174,65 \text{ MPa}$$

Kde:

$\sigma_{otx} = 82,7 \text{ MPa}$, dle rovnice (4.27)

$\sigma_{x2} = 122,6 \text{ MPa}$, dle rovnice (4.40)

Minimální tahové napětí v dolní pásnici

$$\sigma_{tmin} = \frac{M_{omaxk}}{W_{ox2}} \quad (4.42)$$

$$\sigma_{tmin} = \frac{1,39 \cdot 10^8}{6,89 \cdot 10^6}$$

$$\sigma_{tmin} = 20,18 \text{ MPa}$$

Kde:

$M_{omaxk} = 1,39 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$, dle rovnice (4.17)

$W_{ox2} = 6,89 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$, dle rovnice (4.23)

Při stanovení výpočtové únavové pevnosti se opět postupovalo dle [12], tab. 17, str. 29. Byla zohledněna vrubová skupina konstrukčního prvku dle [12], tab. 19, str. 31. Základní výpočtová únavová pevnost vycházející z odvozené provozní a vrubové skupiny je $R_{fat_1} = 169,7 \text{ MPa}$ dle [12], tab. 14, str. 27. Pro výpočet bylo nutné určit poměr mezních napětí a dále postupovat dle [12], str. 29.

Poměr mezních napětí

$$\chi = \frac{\sigma_{tmin}}{\sigma_{tmax}} \quad (4.43)$$

$$\chi = \frac{20,18}{174,65}$$

$$\chi = 0,115$$

Kde:

$$\sigma_{tmax} = 174,65 \text{ MPa, dle rovnice (4.41)}$$

$$\sigma_{tmin} = 20,18 \text{ MPa, dle rovnice (4.42)}$$

$$R_{fatto} = \frac{5}{3} \cdot R_{fat_1} \quad (4.44)$$

$$R_{fatto} = \frac{5}{3} \cdot 169,7$$

$$R_{fatto} = 282,83 \text{ MPa}$$

Kde:

$$R_{fat_1} = 169,7 \text{ MPa, dle [12], tab. 14, str. 27}$$

$$R_{fatt\chi} = \frac{R_{fatto}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fatto}}{0,75 \cdot f_u}\right) \cdot \chi} \quad (4.45)$$

$$R_{fatt\chi} = \frac{282,83}{1 - \left(1 - \frac{282,83}{(0,75 \cdot 340)}\right) \cdot 0,116}$$

$$R_{fatt\chi} = 279,31 \text{ MPa}$$

Dle [12], tab. 15, str. 28 je maximální dovolená hodnota pro ocel řady 37 $R_{fatp\chi} = 180 \text{ MPa}$.

$$R_{fatp\chi} \geq |\sigma_{tmax}| \quad (4.45)$$

$$180 \geq 174,65 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$$f_u = 340 \text{ MPa, dle [6], str. 27}$$

$$R_{fatto} = 282,83 \text{ MPa, dle rovnice (4.44)}$$

$\chi = 0,115$, dle rovnice (4.43)

4.3.3. Napětí ve stojině

Napětí ve stojině od lokálního ohybu příruby se skládá z napětí membránového a ohybového. Při výpočtu se postupovalo dle [13], str. 67.

Výpočet potřebných koeficientů

$$C_{zm} = 0,4 + (1,8 \cdot r_t^2) \quad (4.46)$$

$$C_{zm} = 0,4 + (1,8 \cdot 0,32^2)$$

$$C_{zm} = 0,58432$$

Kde:

$$r_t = 0,32, \text{ dle rovnice (4.38)}$$

$$C_{zb} = (0,01 + 0,0212 \cdot r_t^3) \cdot \left(0,125 \cdot \frac{b}{a} + 0,25\right)^{0,125} \quad (4.47)$$

$$C_{zb} = (0,01 + 0,0212 \cdot 0,32^3) \cdot \left(0,125 \cdot \frac{380}{63} + 0,25\right)^{0,125}$$

$$C_{zb} = 9,82 \cdot 10^{-3}$$

Kde:

$$r_t = 0,32, \text{ dle rovnice (4.38)}$$

$$a = 63 \text{ mm}, \text{ dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

$$b = 380 \text{ mm}, \text{ dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

$$k_{z0} = 2 + 1,5 \cdot \sin[1,5 \cdot \pi \cdot (0,35 - r_t)] + 0,45 \cdot \sin[4 \cdot \pi \cdot (r_t - 0,5)] \quad (4.48)$$

$$k_{z0} = 2 + 1,5 \cdot \sin[1,5 \cdot \pi \cdot (0,35 - 0,32)] + 0,45 \cdot \sin[4 \cdot \pi \cdot (0,32 - 0,5)]$$

$$k_{z0} = 1,865$$

Kde:

$$r_t = 0,32, \text{ dle rovnice (4.38)}$$

$$k_{zh} = 1 + \frac{k_{z0}}{1 + 0,0004536 \cdot r_h^3} \quad (4.49)$$

$$k_{zh} = 1 + \frac{1,865}{1 + 0,0004536 \cdot 35^3}$$

$$k_{zh} = 1,09$$

Kde:

$$k_{z0} = 1,865, \text{ dle rovnice (4.48)}$$

$$r_h = 35 \text{ mm}, \text{ dle [13], str. 67}$$

Membránové napětí

$$\sigma_{z3m} = C_{zm} \cdot \frac{F_{oL}}{(d + t_f) \cdot t_w} \quad (4.50)$$

$$\sigma_{z3m} = 0,58432 \cdot \frac{5,210 \cdot 10^4}{(44,25 + 25) \cdot 8}$$

$$\sigma_{z3m} = 54,95 \text{ MPa}$$

Kde:

$$C_{zm} = 0,58432, \text{ dle rovnice (4.46)}$$

$$d = 44,25 \text{ mm}, \text{ dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

$$F_{oL} = 5,21 \cdot 10^4 \text{ N}, \text{ dle rovnice (4.36)}$$

$$t_f = h_{pd} = 25 \text{ mm}, \text{ dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

$$t_w = b_s = 8 \text{ mm}, \text{ dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

Ohybové napětí

$$\sigma_{z3b} = k_{zh} \cdot C_{zb} \cdot \frac{6 \cdot F_{oL} \cdot d}{t_w^3 \cdot [1 + (2 \cdot r_t)^{-3}]} \quad (4.51)$$

$$\sigma_{z3b} = 1,09 + 9,82 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{6 \cdot 5,210 \cdot 10^4 \cdot 44,25}{8^3 \cdot [1 + (2 \cdot 0,32)^{-3}]}$$

$$\sigma_{z3b} = 60,1 \text{ MPa}$$

Kde:

$$F_{oL} = 5,21 \cdot 10^4 \text{ N}, \text{ dle rovnice (4.36)}$$

$$r_t = 0,32, \text{ dle rovnice (4.38)}$$

$$d = 44,25 \text{ mm}, \text{ dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

$$k_{zh} = 1,09, \text{ dle rovnice (4.49)}$$

$$C_{zb} = 9,82 \cdot 10^{-3}, \text{ dle rovnice (4.47)}$$

$$t_w = b_s = 8 \text{ mm}, \text{ dle konstrukce nosníku, obr. 14}$$

Napětí ve stojině v přechodu svaru (obr. 15)

$$\sigma_{z3} = \sigma_{z3m} + \sigma_{z3b} \quad (4.52)$$

$$\sigma_{z3} = 54,95 + 60,1$$

$$\sigma_{z3} = 115,1 \text{ MPa}$$

Kde:

$$\sigma_{z3m} = 54,95 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (4.50)}$$

$$\sigma_{z3b} = 60,1 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (4.51)}$$

Celkové napětí ve stojině v součtu s globálním

$$\sigma_{sc} = \sigma_{z3} + 0,75\sigma_{gs} \quad (4.53)$$

$$\sigma_{sc} = 115,5 + 0,75 \cdot 75$$

$$\sigma_{sc} = 171,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{dov} \geq \sigma_{sc} \quad (4.54)$$

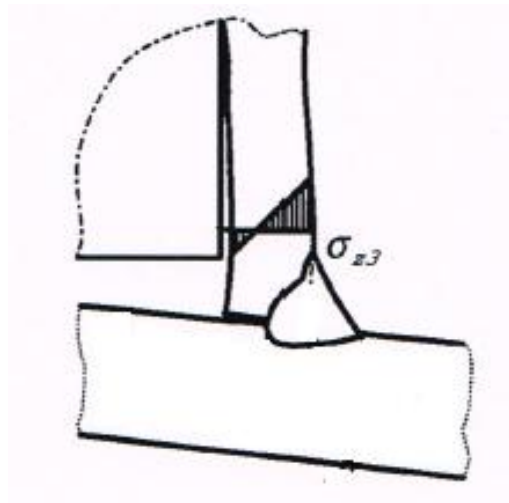
$$205 \geq 171,75 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$$\sigma_{z3} = 115,1 \text{ MPa, dle rovnice (4.52)}$$

$$\sigma_{gs} = 75 \text{ MPa, globální napětí v přechodu příruba stojina (z lineárního průběhu)}$$

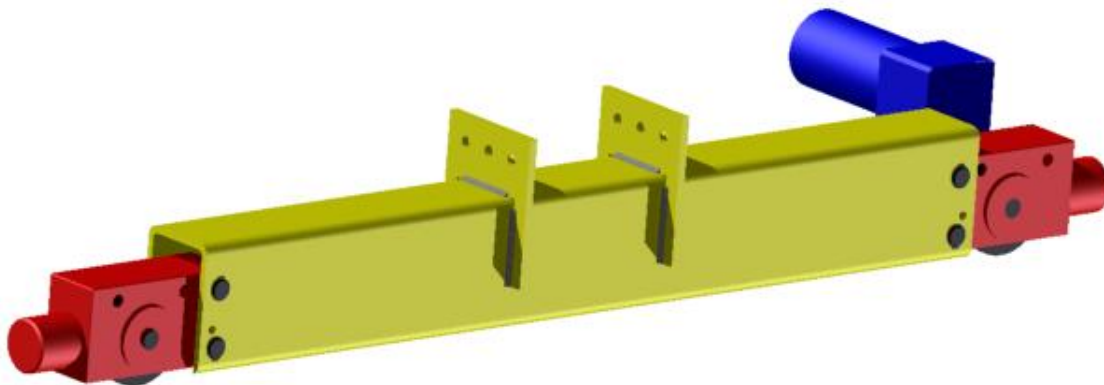
$$\sigma_{dov} = 205 \text{ MPa, dle [6], str. 27}$$



Obr. 15 Napětí v přechodu příruba – stojina [13], str. 66

Aby se zabránilo boulení stěn (stojin) hlavního nosníku, byly použity příčné výztuhy s doporučenou roztečí.

5. NÁVRH PŘÍČNÍKU



Obr. 16 Příčník [vlastní práce]

Maximální svislé zatížení na příčník nastane, když je kočka s břemenem v minimální vzdálenosti od příčníku. Nejdříve byl z maximálního dovoleného průhybu určen minimální kvadratický moment příčníku.

5.1. Minimální kvadratický moment průřezu

Minimální kvadratický moment průřezu se určí na základě maximálního dovoleného průhybu. Dosadilo se tedy za dovolený průhyb $f_{dp} = L_p/500$. [9], str. 43

$$I_{pxmin} = \frac{F_{rB2} \cdot L_p^3}{48 \cdot E \cdot f_{dp}} = \frac{F_{rB2} \cdot L_p^3}{48 \cdot E \cdot \frac{L_p}{500}} \quad (5.1)$$

$$I_{pxmin} = \frac{1,731 \cdot 10^5 \cdot 2500^3}{48 \cdot E \cdot \frac{2500}{500}}$$

$$I_{pxmin} = 5,365 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Kde:

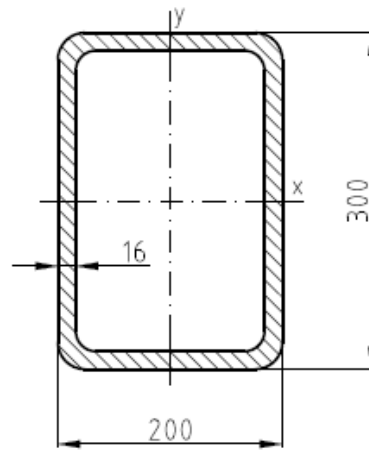
$$F_{rB2} = 1,731 \cdot 10^5 \text{ N, dle rovnice (4.9)}$$

$$L_p = 2500 \text{ mm, dle zadání}$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

5.2. Volba průřezu

Byl zvolen obdélníkový průřez MSH 300x200x16 válcovaný za tepla. Byl zvolen druhý nejbližší větší průřez, který svým kvadratickým momentem převyšoval minimální možný, a to i z důvodu větších rozměrů pro montáž bloků pojezdových kol a montáž hlavního nosníku.



Obr. 17 Průřez příčnicku [vlastní práce]

Parametry průřezu nutné pro další výpočet

$$I_{pxskut} = 173900000 \text{ mm}^4, \text{ dle [14]}$$

$$W_{xp} = 1160000 \text{ mm}^3, \text{ dle [14]}$$

$$W_{yp} = 911000 \text{ mm}^3, \text{ dle [14]}$$

$$G_p = 115,4 \text{ kg/m}, \text{ dle [14]}$$

6. PEVNOSTNÍ VÝPOČET PŘÍČNÍKU

6.1. Výpočet průhybu příčnicku

Maximální dovolený průhyb dle [6], str. 606

$$f_{dp} = \frac{L_p}{500} \quad (6.1)$$

$$f_{dp} = \frac{2500}{500}$$

$$f_{dp} = 5 \text{ mm}$$

Kde:

$L_p = 2500 \text{ mm}$, dle zadání

Průhyb příčnicku dle [9], str. 43

Průhyb se skládá z průhybu od zatěžující svislé síly F_{rB2} a z průhybu od vlastní hmotnosti příčnicku.

$$f_p = \frac{5 \cdot (G_p \cdot g) \cdot 10^{-3} \cdot L_p^4}{384 \cdot E \cdot I_{pxskut}} + \frac{F_{rB2} \cdot L_p^3}{48 \cdot E \cdot I_{pxskut}} \quad (6.2)$$

$$f_p = \frac{5 \cdot (115,4 \cdot 9,81) \cdot 10^{-3} \cdot 2500^4}{384 \cdot 210000 \cdot 173900000} + \frac{1,731 \cdot 10^5 \cdot 2500^3}{48 \cdot 210000 \cdot 173900000}$$

$$f_p = 1,56 \text{ mm}$$

$$f_{dp} \geq f_p \quad (6.3)$$

$$5 \geq 1,56 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$G_p = 115,4 \text{ kg/m}$, dle [14]

$F_{rB2} = 1,731 \cdot 10^5 \text{ N}$, dle rovnice (4.9)

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$f_{dp} = 5 \text{ mm}$, dle rovnice (6.1)

$L_p = 2500 \text{ mm}$, dle zadání

$E = 210000 \text{ MPa}$

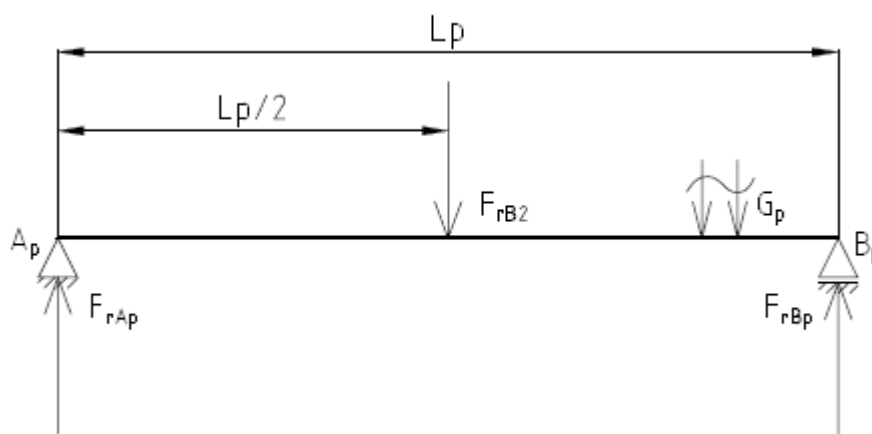
$I_{pxskut} = 173900000 \text{ mm}^4$, dle [14]

6.2. Vnitřní silové účinky

6.2.1. Svislé vnitřní silové účinky

Jsou způsobeny svislým zatížením hlavního nosníku za nejnepříznivějšího stavu pro příčnick, tedy když je kočka s břemenem nejbližší příčnicku. Do účinků je zahrnuta i samotná hmotnost příčnicku.

Reakce kol příčnicku od svislého zatížení



Obr. 18 Schéma příčnicku – maximální svislé zatížení [vlastní práce]

$$F_{rAp} = \frac{1}{2} \cdot F_{rB2} + \frac{G_p \cdot g \cdot L_p \cdot 10^{-3} \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1}}{2} \quad (6.4)$$

$$F_{rAp} = \frac{1}{2} \cdot 1,731 \cdot 10^5 + \frac{115,4 \cdot 9,81 \cdot 2500 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 1,34}{2}$$

$$F_{rAp} = 8,862 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$F_{rBp} = F_{rAp} = 8,862 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Kde:

$$G_p = 115,4 \text{ kg/m, dle [14]}$$

$$F_{rB2} = 1,731 \cdot 10^5 \text{ N, dle rovnice (4.9)}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$L_p = 2500 \text{ mm, dle zadání}$$

$$\phi_1 = 1,1, \text{ dle [10], str. 13}$$

$$\gamma_{p1} = 1,34, \text{ dle [10], str. 31}$$

Svislý maximální ohybový moment

$$M_{opmax} = F_{rAp} \cdot \frac{L_p}{2} \quad (6.5)$$

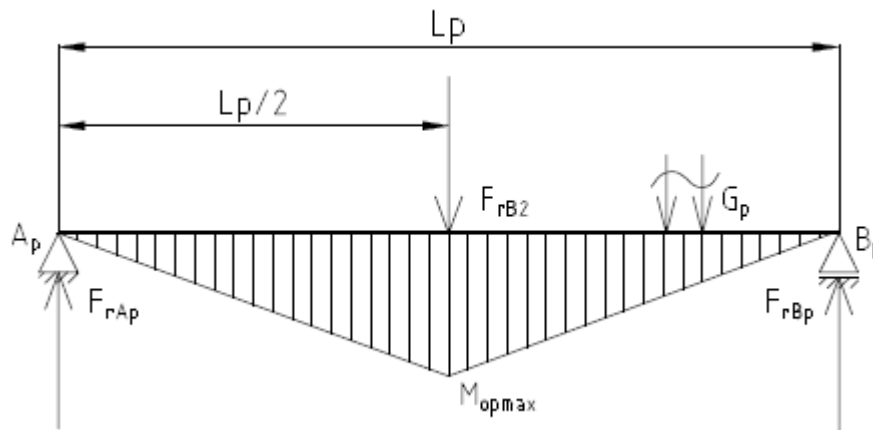
$$M_{opmax} = 8,862 \cdot 10^4 \cdot \frac{2500}{2}$$

$$M_{opmax} = 1,12 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

Kde:

$$F_{rAp} = 8,862 \cdot 10^4 \text{ N, dle rovnice (6.4)}$$

$$L_p = 2500 \text{ mm, dle zadání}$$



Obr. 19 Maximální ohybový moment v příčniku [vlastní práce]

Statický moment průřezu v ose x dle [15], str. 26

$$S_{xp} = t_p \cdot (b_{pp} - 2 \cdot t_p) \cdot \frac{1}{2} \cdot (h_{pp} - t_p) + 2 \cdot t_p \cdot \left(\frac{h_{pp}}{2} - z \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_{pp}}{2} + z \right) \quad (6.6)$$

$$S_{xp} = 16 \cdot (200 - 2 \cdot 16) \cdot \frac{1}{2} \cdot (300 - 16) + 2 \cdot 16 \cdot \left(\frac{300}{2} - 0 \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{300}{2} + 0 \right)$$

$$S_{xp} = 7,42 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Kde:

$t_p = 16 \text{ mm}$, dle [14]

$b_{pp} = 200 \text{ mm}$, dle [14]

$h_{pp} = 300 \text{ mm}$, dle [14]

$z = 0 \text{ mm}$ - žádný posun těžiště profilu

Smykové napětí od svislého namáhání dle [15], str. 22

$$\tau_{sp} = \frac{F_{rAp} \cdot S_{xp}}{I_{pxskut} \cdot 2 \cdot t_p} \quad (6.7)$$

$$\tau_{sp} = \frac{8,862 \cdot 10^4 \cdot 7,42 \cdot 10^5}{173900000 \cdot 2 \cdot 16}$$

$$\tau_{sp} = 11,81 \text{ MPa}$$

Kde:

$F_{rAp} = 8,862 \cdot 10^4 \text{ N}$, dle rovnice (6.4)

$S_{xp} = 7,42 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$, dle rovnice (6.6)

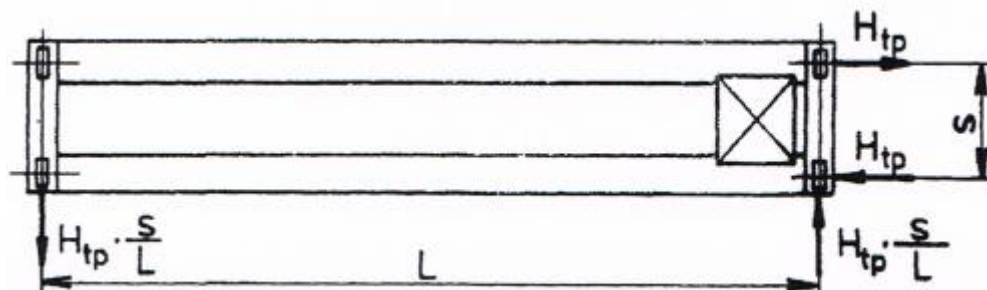
$I_{pxskut} = 173900000 \text{ mm}^4$, dle [14]

$t_p = 16 \text{ mm}$, dle [14]

6.2.2. Vodorovné vnitřní silové účinky

Příčení

Příčník je ve vodorovném směru namáhán příčením nosníku při pojezdu. Výpočet byl proveden dle ČSN 27 0103. [12], str. 12



Obr. 20 Schéma příčení [12]

Tlak pod jedním kolem jeřábu

$$F_{kp} = \frac{K_1 \cdot (a_k + b_1) + K_2 \cdot b_1}{2 \cdot L} + \frac{\frac{m_n}{L} \cdot g \cdot L}{4} + \frac{G_p \cdot g \cdot 10^{-3} \cdot L_p}{2} \quad (6.8)$$

$$F_{kp} = \frac{34129,971 \cdot (940 + 5710) + 73632,9 \cdot 5710}{2 \cdot 12000} + \frac{\frac{2,43 \cdot 10^3}{12000} \cdot 9,81 \cdot 12000}{4} + \frac{115,4 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2500}{2}$$

$$F_{kp} = 3,44 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Kde:

$$K_1 = 34129,971 \text{ N, dle rovnice (3.2)}$$

$$K_2 = 73632,9 \text{ N, dle rovnice (3.1)}$$

$$G_p = 115,4 \text{ kg/m, dle [14]}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$L_p = 2500 \text{ mm, dle zadání}$$

$$m_n = 2,431 \cdot 10^3 \text{ kg, dle rovnice (3.9)}$$

Součinitel příčení

$$\lambda = 0,025 \cdot \frac{L}{L_p} \quad (6.9)$$

$$\lambda = 0,025 \cdot \frac{12000}{2500}$$

$$\lambda = 0,12$$

Kde:

$L_p = 2500 \text{ mm}$, dle zadání

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

Příčná síla

$$H_{tp} = \gamma_{tp} \cdot \lambda \cdot 2 \cdot F_{kp} \quad (6.10)$$

$$H_{tp} = 1,1 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 3,44 \cdot 10^4$$

$$H_{tp} = 9,1 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Kde:

$F_{kp} = 3,44 \cdot 10^4 \text{ N}$, dle rovnice (6.8)

$\lambda = 0,12$, dle rovnice (6.9)

$\gamma_{tp} = 1,1$, dle [12]

Vodorovný ohybový moment

$$M_{opv} = H_{tp} \cdot \frac{L_p}{2} \quad (6.11)$$

$$M_{opv} = 9,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{2500}{2}$$

$$M_{opv} = 1,134 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

Kde:

$L_p = 2500 \text{ mm}$, dle zadání

$H_{tp} = 9,1 \cdot 10^3 \text{ N}$, dle rovnice (6.10)

6.3. Posouzení únosnosti příčnicku

6.3.1. Posouzení statické únosnosti příčnicku

Účelem je zabránit vznikutí nadměrných deformací na mezi kluzu materiálu. Nejdříve bylo nutné vypočítat napětí v osách x a y . Do výpočtu byl zahrnut i vliv smykového namáhání profilu.

Napětí od momentu v ose x

$$\sigma_{spx} = \frac{M_{opmax}}{W_{xp}} \quad (6.12)$$

$$\sigma_{spx} = \frac{1,11 \cdot 10^8}{1160000}$$

$$\sigma_{spx} = 95,495 \text{ MPa}$$

Kde:

$M_{opmax} = 1,11 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$, dle rovnice (6.5)

$$W_{xp} = 1160000 \text{ mm}^3, \text{ dle [14]}$$

Napětí od momentu v ose y

$$\sigma_{spx} = \frac{M_{opv}}{W_{yp}} \quad (6.13)$$

$$\sigma_{spx} = \frac{1,134 \cdot 10^7}{911000}$$

$$\sigma_{spx} = 12,44 \text{ MPa}$$

Kde:

$$M_{opv} = 1,134 \cdot 10^7 \text{ Nmm}, \text{ dle rovnice (6.11)}$$

$$W_{yp} = 911000 \text{ mm}^3, \text{ dle [14]}$$

Statická únosnost příčnicku – posouzení dle [11], str. 33

$$stat_p = \left(\frac{\sigma_{spx}}{\sigma_{dov}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{spx}}{\sigma_{dov}} \right)^2 - \frac{\sigma_{spx} \cdot \sigma_{spx}}{\sigma_{dov} \cdot \sigma_{dov}} + \left(\frac{\tau_{sp}}{\tau_{spd}} \right)^2 \quad (6.14)$$

$$stat_p = \left(\frac{95,496}{205} \right)^2 + \left(\frac{12,44}{205} \right)^2 - \frac{12,44 \cdot 95,496}{205 \cdot 205} + \left(\frac{11,81}{118} \right)^2$$

$$stat_p = 0,202$$

$$stat_p \leq 1 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$$\sigma_{spx} = 95,496 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (6.12)}$$

$$\sigma_{spx} = 12,44 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (6.13)}$$

$$\tau_{sp} = 11,81 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (6.7)}$$

$$\sigma_{dov} = 205 \text{ MPa}, \text{ dle [6], str. 27}$$

$$\tau_{spd} = 118 \text{ MPa}, \text{ dle [6], str. 27}$$

6.3.2. Prokázání únavové pevnosti příčnicku

U příčnicku byla provedena kontrola na únavu u dolní pásnice válcovaného profilu, která je namáhána míjivým tahovým napětím.

Maximální tahové napětí ve spodní pásnici

$$\sigma_{tmaxpx} = \sigma_{spx} \quad (6.15)$$

$$\sigma_{spx} = 95,5 \text{ MPa}$$

Kde:

$$\sigma_{spx} = 95,5 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (6.12)}$$

Minimální tahové napětí ve spodní pásnici

$$\sigma_{tminpx} = \frac{M_{opmin}}{W_{xp}} \quad (6.16)$$

$$\sigma_{tminpx} = \frac{2,155 \cdot 10^7}{1160000}$$

$$\sigma_{tminpx} = 18,58 \text{ MPa}$$

Kde:

$$M_{opmin} = 2,155 \cdot 10^7 \text{ Nmm, dle rovnice (6.18)}$$

$$W_{xp} = 1160000 \text{ mm}^3, \text{ dle [14]}$$

Doplňující výpočty k rovnici (6.16):

Zatěžující síla na příčník bez břemene

$$F_{rBp1} = \frac{1}{2} \cdot F_{rB12} + \frac{G_p \cdot g \cdot L_p \cdot 10^{-3} \cdot \phi_1 \cdot \gamma_{p1}}{2} \quad (6.17)$$

$$F_{rBp1} = \frac{1}{2} \cdot 2,431 \cdot 10^4 + \frac{115,4 \cdot 9,81 \cdot 2500 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 1,34}{2}$$

$$F_{rBp1} = 1,424 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Kde:

$$F_{rB12} = 2,431 \cdot 10^4 \text{ N, dle rovnice (4.14)}$$

$$L_p = 2500 \text{ mm, dle zadání}$$

$$G_p = 115,4 \text{ kg/m, dle [14]}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\phi_1 = 1,1, \text{ dle [10], str. 13}$$

$$\gamma_{p1} = 1,34, \text{ dle [10], str. 31}$$

Minimální ohybový moment na příčník

$$M_{opmin} = F_{rBp1} \cdot \frac{L_p}{2} \quad (6.18)$$

$$M_{opmin} = 1,424 \cdot 10^4 \cdot \frac{2500}{2}$$

$$M_{opmin} = 1,78 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

Kde:

$$L_p = 2500 \text{ mm, dle zadání}$$

$$F_{rBp1} = 1,424 \cdot 10^4 \text{ N, dle rovnice (6.17)}$$

Při stanovení výpočtové únavové pevnosti se opět postupovalo dle [12], tab. 17, str. 29. Byla zohledněna vrubová skupina konstrukčního prvku dle [12], tab. 19, str. 31. Základní výpočtová únavová pevnost vycházející z odvozené provozní a vrubové

skupiny je $R_{fat_1} = 169,7 \text{ MPa}$ dle [12], tab. 14, str. 27. Pro výpočet bylo nutné určit poměr mezních napětí a dále postupovat dle [12], str. 29.

Poměr mezních napětí

$$\chi = \frac{\sigma_{tminpx}}{\sigma_{tmaxpx}} \quad (6.19)$$

$$\chi = \frac{15,35}{95,495}$$

$$\chi = 0,161$$

Kde:

$$\sigma_{tminpx} = 15,35 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (6.16)}$$

$$\sigma_{tmaxpx} = \sigma_{spx} = 95,495 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (6.12)}$$

$$R_{fatto} = \frac{5}{3} \cdot R_{fat_1} \quad (6.20)$$

$$R_{fatto} = \frac{5}{3} \cdot 169,7$$

$$R_{fatto} = 282,83 \text{ MPa}$$

Kde:

$$R_{fat_1} = 169,7 \text{ MPa}, \text{ dle [12]}$$

$$R_{fatt\chi} = \frac{R_{fatto}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fatto}}{0,75 \cdot f_u}\right) \cdot \chi} \quad (6.21)$$

$$R_{fatt\chi} = \frac{282,83}{1 - \left(1 - \frac{282,83}{0,75 \cdot 340}\right) \cdot 0,161}$$

$$R_{fatt\chi} = 277,96 \text{ MPa}$$

Dle [12], tab. 15, str. 28 je maximální dovolená hodnota pro ocel řady 37 $R_{fatp\chi} = 180 \text{ MPa}$.

$$R_{fatp\chi} \geq |\sigma_{tmaxpx}| \quad (6.22)$$

$$180 \geq 95,495 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$$R_{fatto} = 282,83 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (6.20)}$$

$$f_u = 340 \text{ MPa}, \text{ dle [6], str. 27}$$

$$\chi = 0,161, \text{ dle rovnice (6.19)}$$

$$\sigma_{tmaxpx} = 95,495 \text{ MPa}, \text{ dle rovnice (6.12)}$$

7. KOMBINACE NAMÁHÁNÍ

Jedná se o jiný postup výpočtu horizontálního namáhání, než jaký byl použit v kapitole 4.2.2.

Jednotlivá zatížení jeřábu během provozu se mohou vyskytovat také spolu v kombinaci. Podle normy ČSN EN 13001-2 se rozdělují tyto kombinace do skupin (A, B, C). V kombinaci skupiny typu A jsou jen zatížení pravidelná. Ve skupině typu B se k nim přidávají občasné zatížení, jako je například zatížení setrvačnými silami od brzdění. V poslední kombinaci C se vyskytují ještě zatížení výjimečná, jako náraz jeřábu na dorazy v krajní poloze.

Jak bylo uvedeno při zvolení koncepce, jeřáb pracuje v uzavřeném prostředí haly, kde není zatížení větrem. Namáhání setrvačnými silami od brzdění nebo zrychlování bude menší než při nárazu jeřábu na dorazy v plné rychlosti. Tudíž byla spočítána kombinace namáhání C3, která obsahuje svislé zatížení od hmotnosti břemene a částí jeřábu spolu s vodorovným zatížením od setrvačných sil vzniklých při nárazu (absence zatížení větrem, $q_v = 0 \text{ N/m}$).

Výpočty ke kombinaci namáhání C3:

Kinetická energie absorbovaná jedním nárazníkem

$$E_k = \frac{1}{4} \cdot (m_n + m_k + 2m_p + m_{ost}) \cdot v^2 \quad (7.1)$$

$$E_k = \frac{1}{4} \cdot (2431 + 985 + 2 \cdot 288,5 + 200) \cdot 0,833^2$$

$$E_k = 728 \text{ J}$$

Kde:

$m_n = 2431 \text{ kg}$, dle rovnice (3.9)

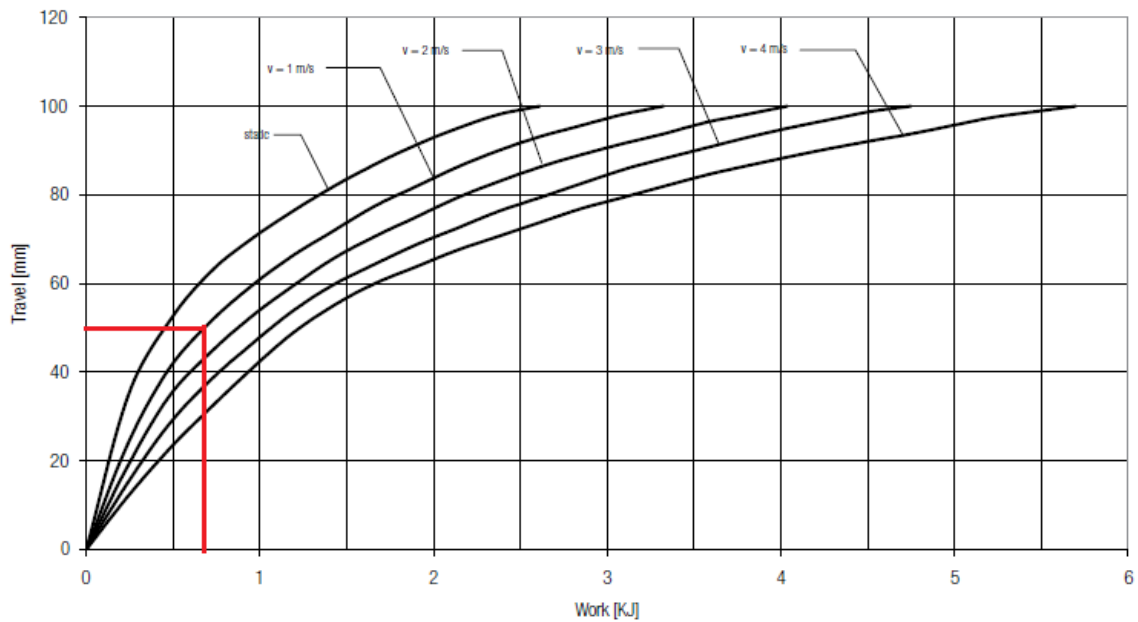
$m_k = 985 \text{ kg}$, dle [5]

$m_p = 288,5 \text{ kg}$, přepočítaná hmotnost příčnicku

$v = 0,833 \text{ m/s}$, maximální rychlost mostu

$m_{ost} = 200 \text{ kg}$, hmotnost bloků pojezdových kol

Polyuretanový nárazník o rozměrech $\varnothing 125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ se po nárazu stlačí o hodnotu podle diagramu. [16]



Obr. 21 Diagram závislosti stlačení nárazníku na zatížení [16]

Zpomalení při nárazu dle [17]

$$a_n = \frac{v^2}{2 \cdot s_n} \quad (7.2)$$

$$a_n = \frac{0,833^2}{2 \cdot 0,05}$$

$$a_n = 6,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Kde:

$v = 0,833 \text{ m/s}$, maximální rychlost mostu

$s_n = 0,05 \text{ m}$, z diagramu obr. 21

Síla na kole kočky v horizontálním směru po nárazu

$$F_{kb} = \frac{1}{2} \cdot m_k \cdot a_n \cdot \phi_5 \cdot y_{p3} \quad (7.3)$$

$$F_{kb} = \frac{1}{2} \cdot 985 \cdot 6,94 \cdot 1,2 \cdot 1,34$$

$$F_{kb} = 5500 \text{ N}$$

Kde:

$m_k = 985 \text{ kg}$, dle [5]

$a_n = 6,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, dle rovnice (7.2)

$\phi_5 = 1,2$, dle [10], str. 18

$y_{p3} = 1,34$, dle [10], str. 31

Zatížení od setrvačných sil vlivem hmotnosti nosníku

$$q_{sm} = \frac{m_n \cdot a_n \cdot \phi_5 \cdot y_{p3}}{L} \quad (7.4)$$

$$q_{sm} = \frac{2431 \cdot 6,94 \cdot 1,2 \cdot 1,34}{12}$$

$$q_{sm} = 2262 \text{ N/m}$$

Kde:

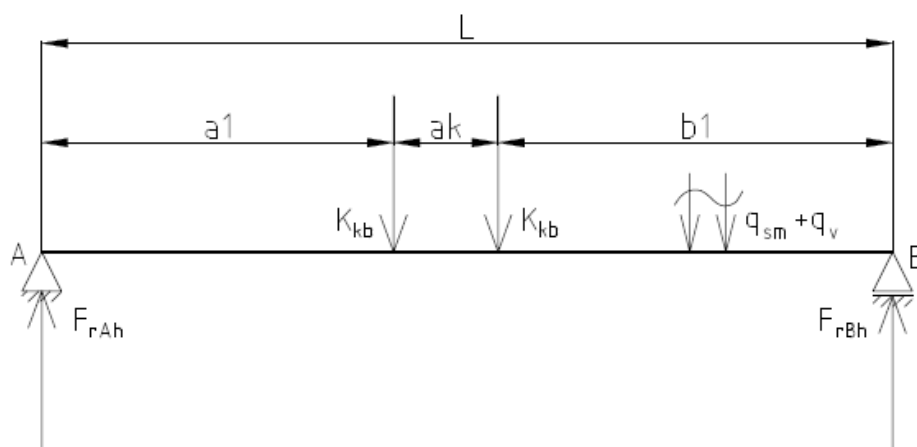
$m_n = 2431 \text{ kg}$, dle rovnice (3.9)

$a_n = 6,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, dle rovnice (7.2)

$\phi_5 = 1,2$, dle [10], str. 18

$y_{p3} = 1,34$, dle [10], str. 31

$L = 12 \text{ m}$, dle zadání



Obr. 22 Boční zatížení nosníku při nárazu [vlastní práce]

Moment od setrvačné síly od hmotnosti nosníku

$$M_{oqsm} = q_{sm} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (7.5)$$

$$M_{oqsm} = 2262 \cdot \frac{12^2}{8}$$

$$M_{oqsm} = 40711 \text{ Nm}$$

Kde:

$q_{sm} = 2262 \text{ N/m}$, dle rovnice (7.4)

$L = 12 \text{ m}$, dle zadání

Reakce hlavního nosníku v horizontálním směru

$$F_{rAh} = \frac{[F_{kb} \cdot (a_k + b_1) + F_{kb} \cdot b_1]}{L} \quad (7.6)$$

$$F_{rAh} = \frac{[5500 \cdot (940 + 5710) + 5500 \cdot 5710]}{12000}$$

$$F_{rAh} = 5665 \text{ N}$$

$$F_{rBh} = \frac{[F_{kb} \cdot a_1 + F_{kb} \cdot (a_k + a_1)]}{L} \quad (7.7)$$

$$F_{rBh} = \frac{[5500 \cdot 5350 + 5500 \cdot (940 + 5350)]}{12000}$$

$$F_{rBh} = 5335 \text{ N}$$

Kde:

$F_{kb} = 5500 \text{ N}$, dle rovnice (7.3)

$L = 12000 \text{ mm}$, dle zadání

$a_k = 940 \text{ mm}$, dle [5]

$a_1 = 5350 \text{ mm}$, dle obr. 22

$b_1 = 5710 \text{ mm}$, dle obr. 22

Moment od setrvačné síly od hmotnosti kočky

$$M_{oks} = F_{rBh} \cdot b_1 \quad (7.8)$$

$$M_{oks} = 5335 \cdot 5,71$$

$$M_{oks} = 30461 \text{ Nm}$$

Kde:

$F_{rBh} = 5335 \text{ N}$, dle rovnice (7.7)

$b_1 = 5,71 \text{ m}$, dle obr. 22

Napětí v horizontálním směru

$$\sigma_{oh} = \frac{M_{oqsm}}{W_{oy}} + \frac{M_{oks}}{W_{oy}} \quad (7.9)$$

$$\sigma_{oh} = \frac{40,71 \cdot 10^6}{1,459 \cdot 10^6} + \frac{30,46 \cdot 10^6}{1,459 \cdot 10^6}$$

$$\sigma_{oh} = 48,9 \text{ MPa}$$

Kde:

$M_{oqsm} = 40,71 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$, dle rovnice (7.5)

$M_{oks} = 30,46 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$, dle rovnice (7.8)

$W_{oy} = 1,459 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$, dle rovnice (4.24)

7.1.Kombinace C3

Jak bylo řečeno výše, bylo vynecháno zatížení větrem ($q_v = 0 \text{ N/m}$).

Celkové napětí

$$\sigma_{oc} = \sigma_{opx} + \sigma_{oh} \quad (7.10)$$

$$\sigma_{oc} = 126,77 + 48,9$$

$$\sigma_{oc} = 175,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc} \leq \sigma_{dov} \quad (7.11)$$

$$175,6 \leq 205 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

$$\sigma_{oh} = 48,9 \text{ MPa, dle rovnice (7.9)}$$

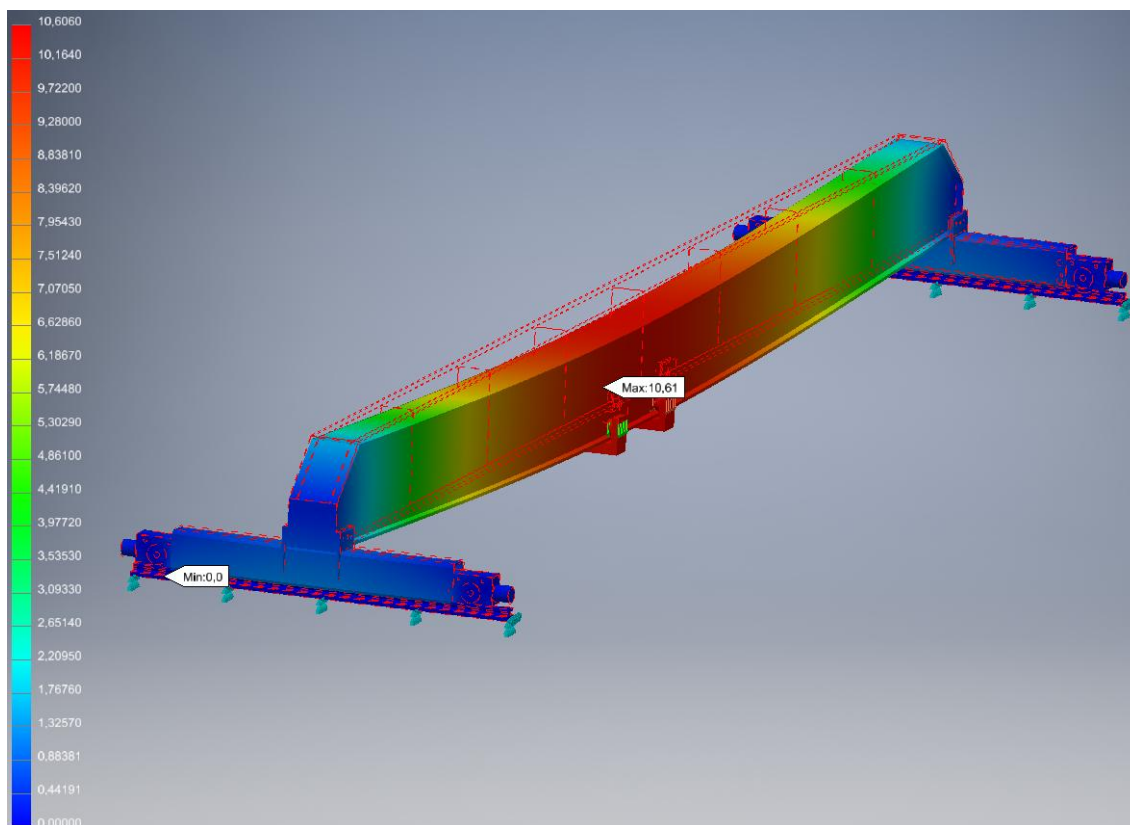
$$\sigma_{opx} = 126,77 \text{ MPa, dle rovnice (4.26)}$$

$$\sigma_{dov} = 205 \text{ MPa, dle [6], str. 27}$$

8. VÝPOČET POMOCÍ MKP

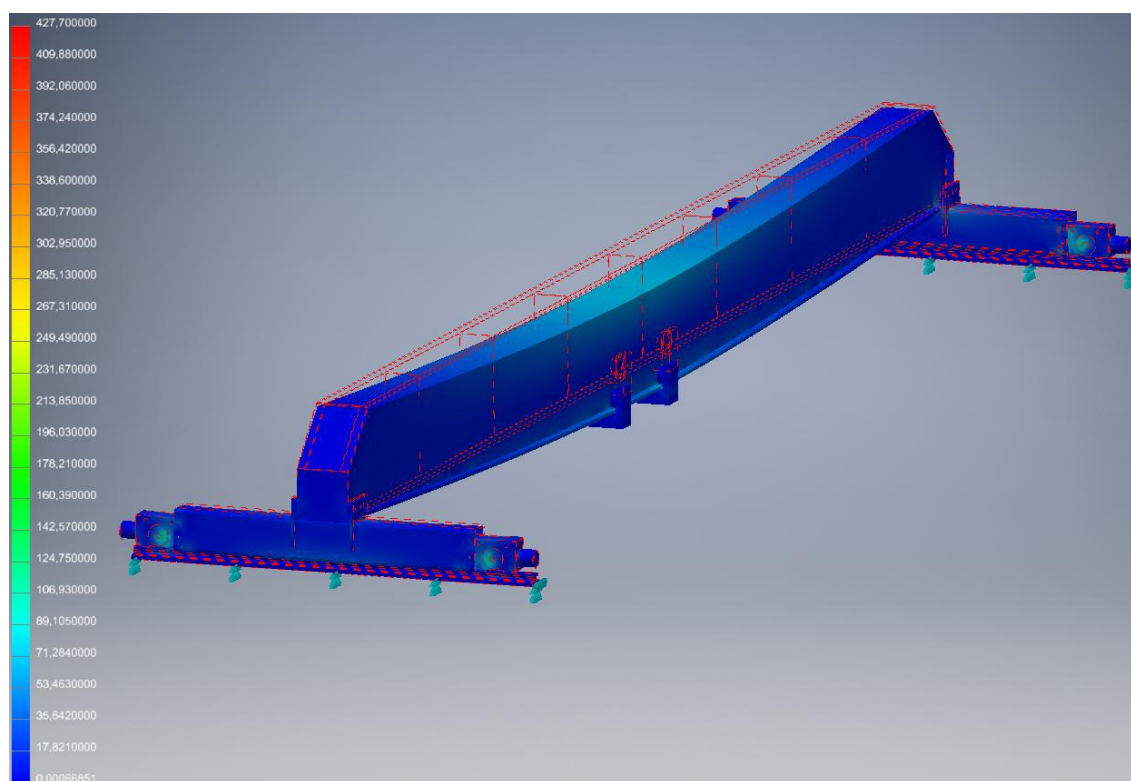
Pomocí metody konečných prvků (MKP) se v inženýrství počítají napětí, deformace, popřípadě proudění apod. K výpočtu napětí a průhybu v nosníku byl použit program Nastran In-CAD 2017. Nosník je zavazben vhodnými vazbami (constraints) tak, aby odpovídal přibližně teoretickému podepření, jako u schémat v ručním výpočtu. Zatížení je na každé z dvojic protějších kol kočky různé, a proto byla umístěna na spodní přírubu náhrada kočky, na jejichž spodních plochách bylo umístěno silové zatížení (load) tak, aby situace co nejlépe odpovídala skutečnosti. Dále je nosník zatížen příslušnými zrychleními (tíhové v ose x , zpomalení od nárazu na nárazníky v ose y).

Analýzou byla nejdříve zjištěna hodnota **statického průhybu hlavního nosníku**. **Průhyb vypočítaný pomocí MKP** vykazoval hodnotu **10,61 mm** (obr. č. 23). Pro srovnání maximální statický průhyb vypočítaný **ručním výpočtem** byl **10,24 mm**.



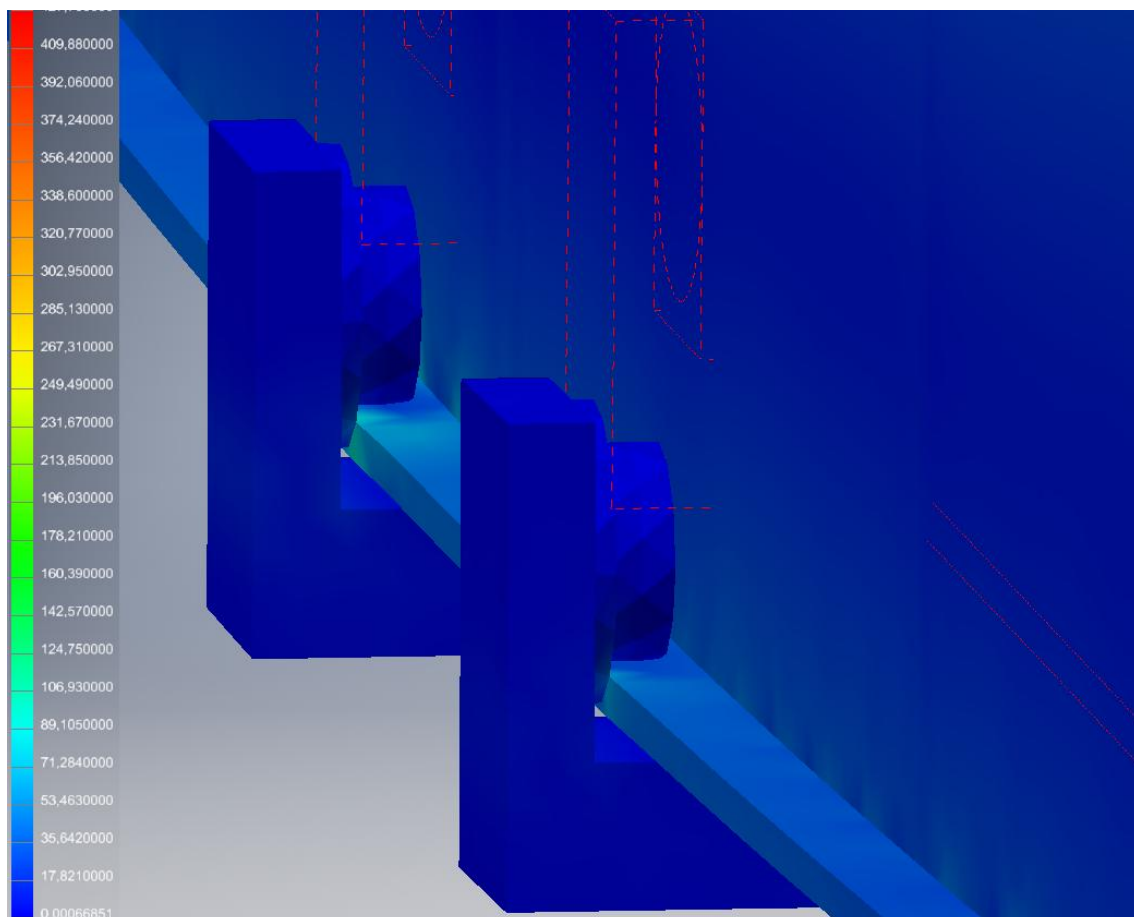
Obr. 23 Statický průhyb od svislého napětí [vlastní práce]

Maximální napětí od svislého **zatížení na horní pásnici** nabývá hodnoty **přibližně 100 MPa**. Špičky napětí vznikly na stěnách bloků pojezdových kol mostu. Nicméně tyto kolové bloky byly vytvořeny vlastnoručně a zjednodušeně a neodpovídají parametrům skutečných bloků od výrobce.



Obr. 24 Napětí od svislého zatížení [vlastní práce]

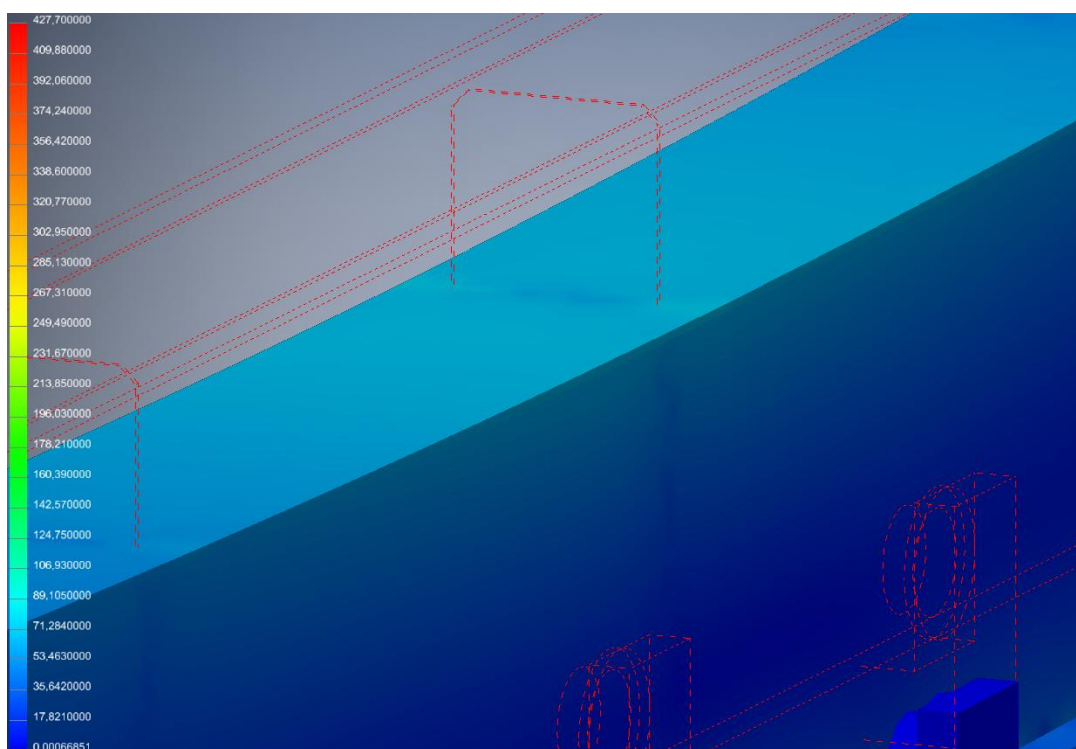
Maximální napětí na dolní pásnici a stojině u přechodu do pásnice **v oblasti pojezdových kol kočky** vykazovalo hodnotu **přibližně 160 MPa**.



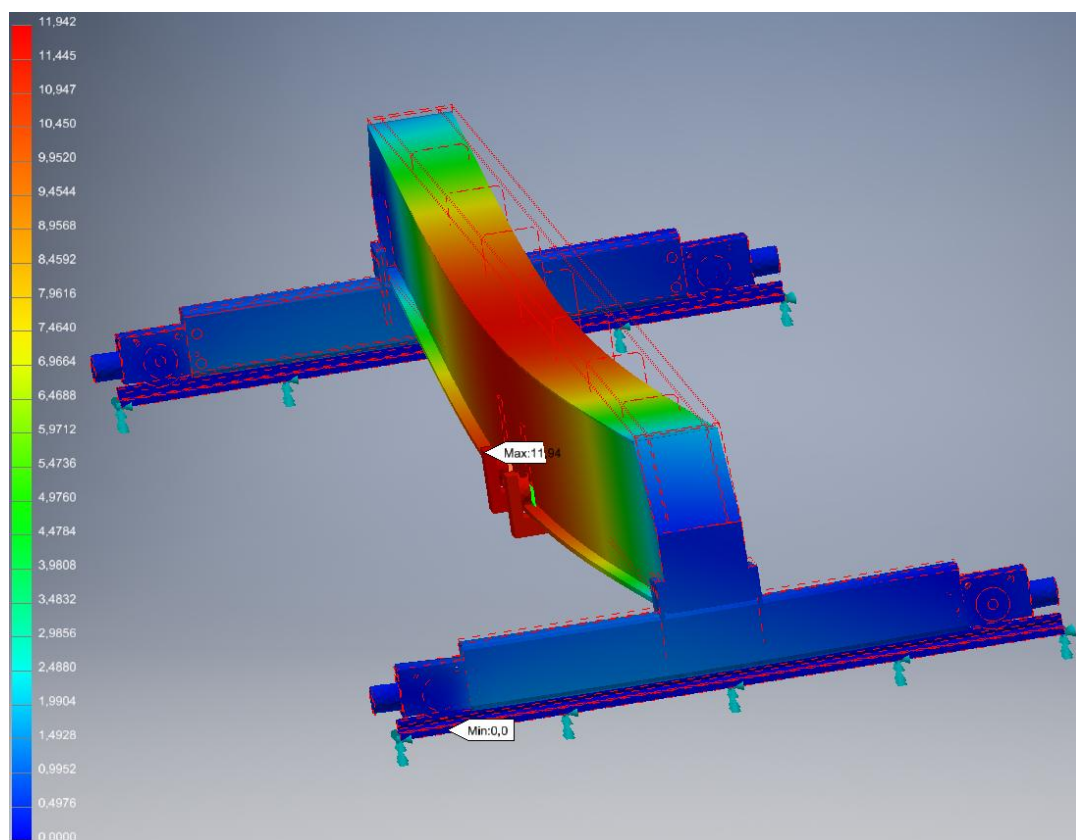
Obr. 25 Napětí pod jezdeckými koly kočky při svislém namáhání [vlastní práce]

Na obr. 25 lze vidět způsob zatížení dolní příruby od kol pojezdějící kočky. Vzniká zde lokální ohyb na okraji příruby. **Maximální napětí na přírubě zatížené větší silou činilo cca 170 MPa** dle barevného spektra.

Na obr. 26 je zobrazen detail napětí v horní pásnici při svislém namáhání.



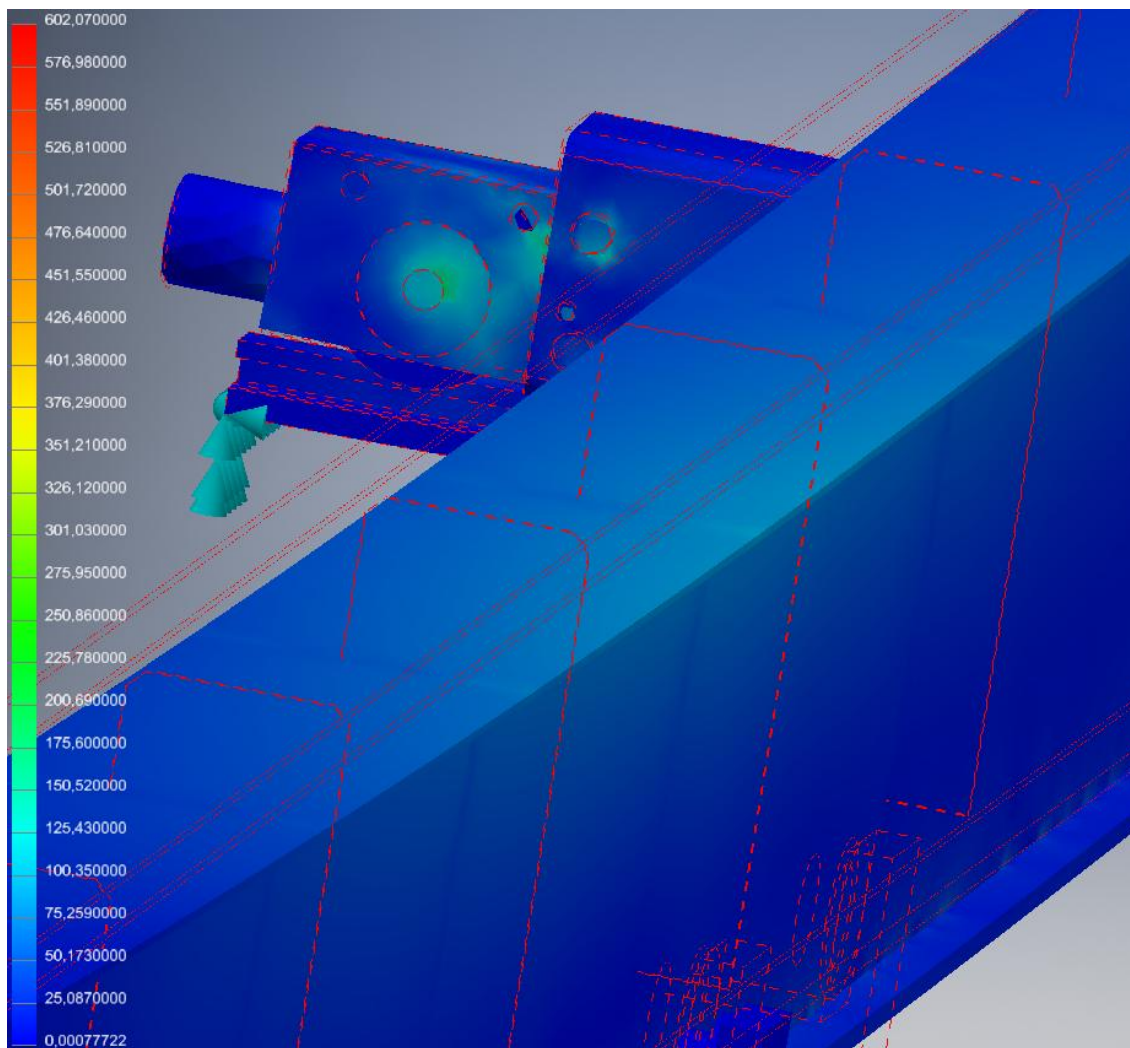
Obr. 26 Detail napětí na horní pásnici při svislém namáhání [vlastní práce]



Obr. 27 Absolutní hodnota deformace při zatížení kombinací C3 [vlastní práce]

Při kombinaci namáhání svislého a příčného (C3), vykazovala **hodnota maximální absolutní deformace hlavního nosníku 11,94 mm** (obr. 27).

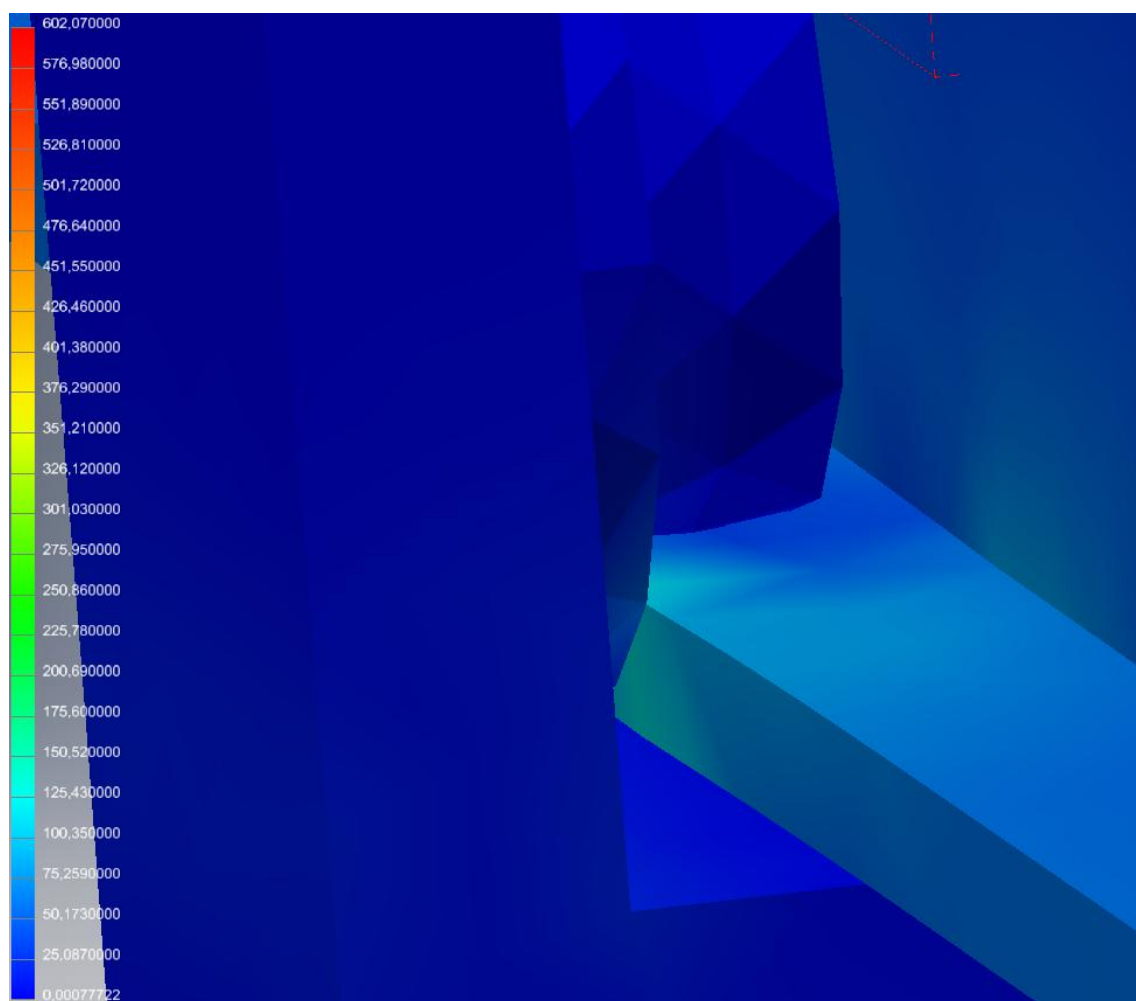
Na obr. 28 lze vidět napětí na horní pásnici při kombinaci namáhání C3. Barevné spektrum je zkresleno napětíovými špičkami, které vznikaly na stěnách bloků pojezdových kol. Jak už bylo řečeno, toto napětí je způsobeno použitím neoriginálního modelu bloku kola, které neodpovídá garantované únosnosti. **Maximální napětí na horní pásnici bylo cca 150 MPa.**



Obr. 28 Napětí na horní pásnici při kombinaci namáhání C3 [vlastní práce]

Detail napětí na dolní přírubě pod pojezdovým kolem kočky je vyobrazen na obr. 29. **Napětí se rovnalo hodnotě přibližně 170 MPa.**

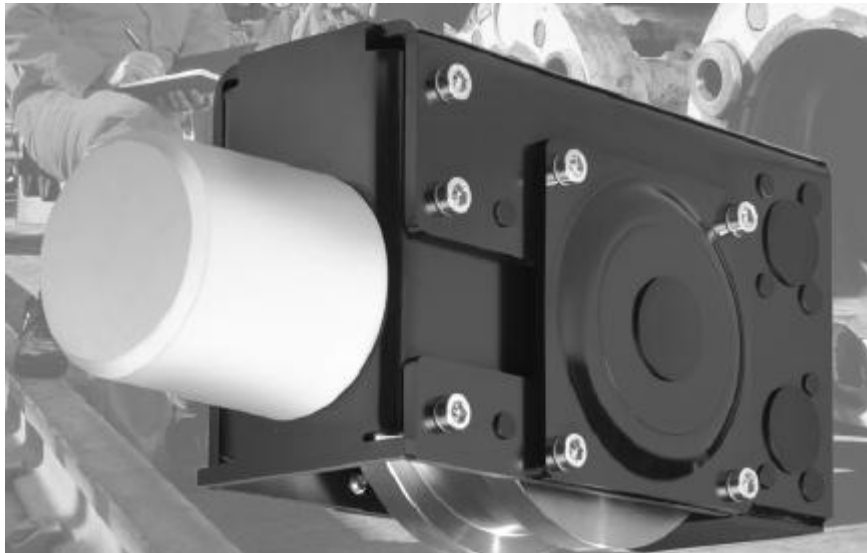
Hodnoty napětí a průhybu z MKP se mírně lišily od hodnot získaných ručním výpočtem. Tyto odchylky jsou způsobeny neuvažováním příčných výztuh v hlavním nosníku i odlišným podepřením oproti teoretické situaci při ručním výpočtu dle schémat. Nicméně napětí na hlavním nosníku a příčníku nepřesáhly dovolenou hodnotu.



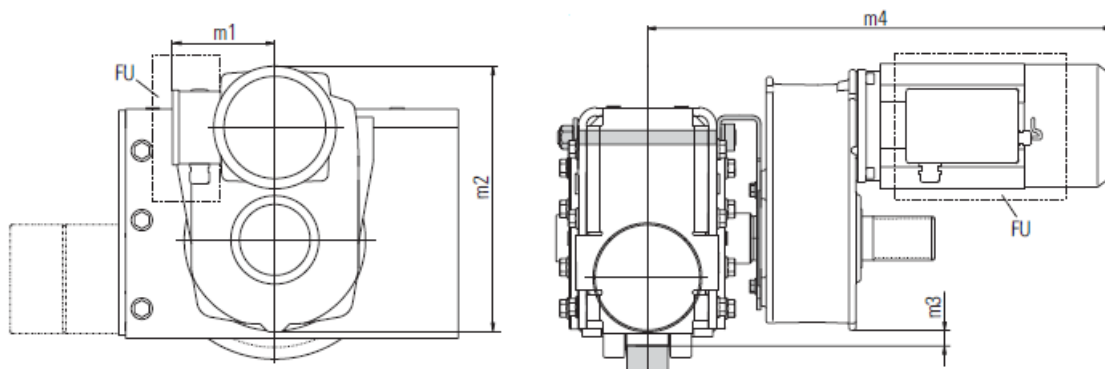
Obr. 29 Detail napětí na dolní přírubě při kombinaci namáhání C3 [vlastní práce]

9. POJEZDOVÁ KOLA

Pojezdová kola byla zvolena od firmy STAHL CraneSystems, Ltd. dle katalogu [18]. Na základě silového působení na jedno kolo pojezdu jeřábu byly vybrány vhodné kolové bloky, které garantují výdrž na toto zatížení.



Obr. 30 Hnaný blok [18]



Obr. 31 Hnací kolový blok s převodovkou a motorem [18]

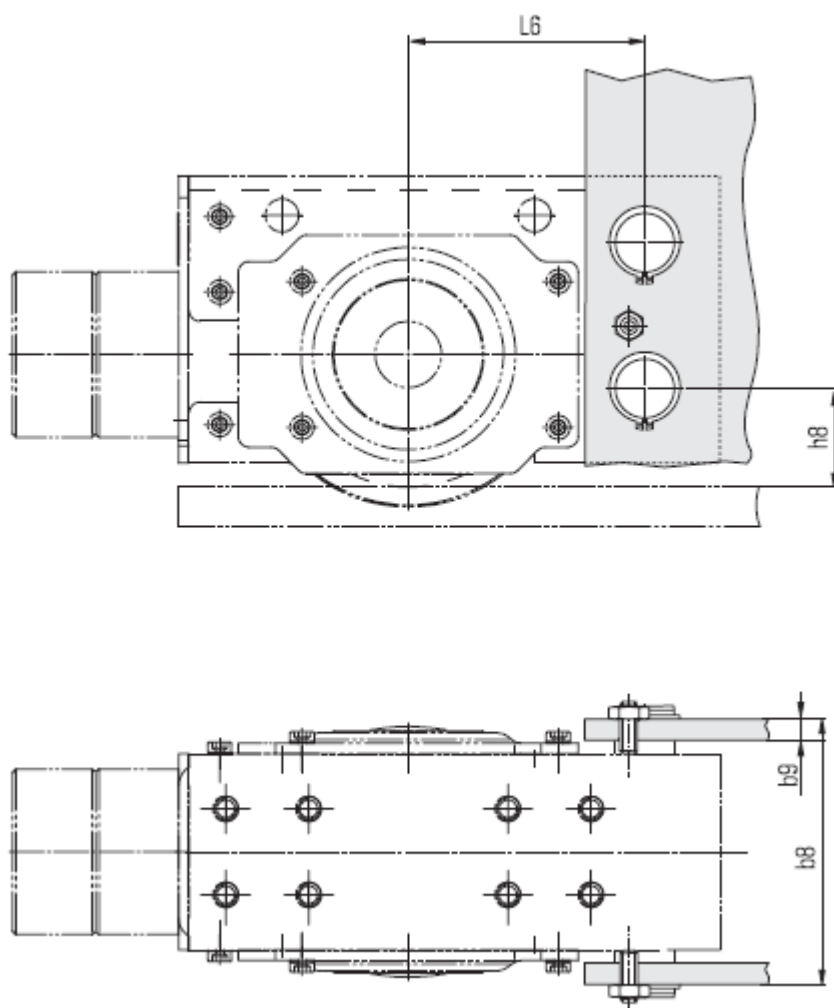
Jako hnané kolo zvoleno SR-S 200.2R/2L

Jako hnací kolo s převodovkou a motorem zvoleno SF 25230132

Parametry:

Průměr kol:	200 mm
Šířka kola mezi nákolky:	74 mm
Šířka kola:	100 mm
Šířka kolejnice:	60 mm

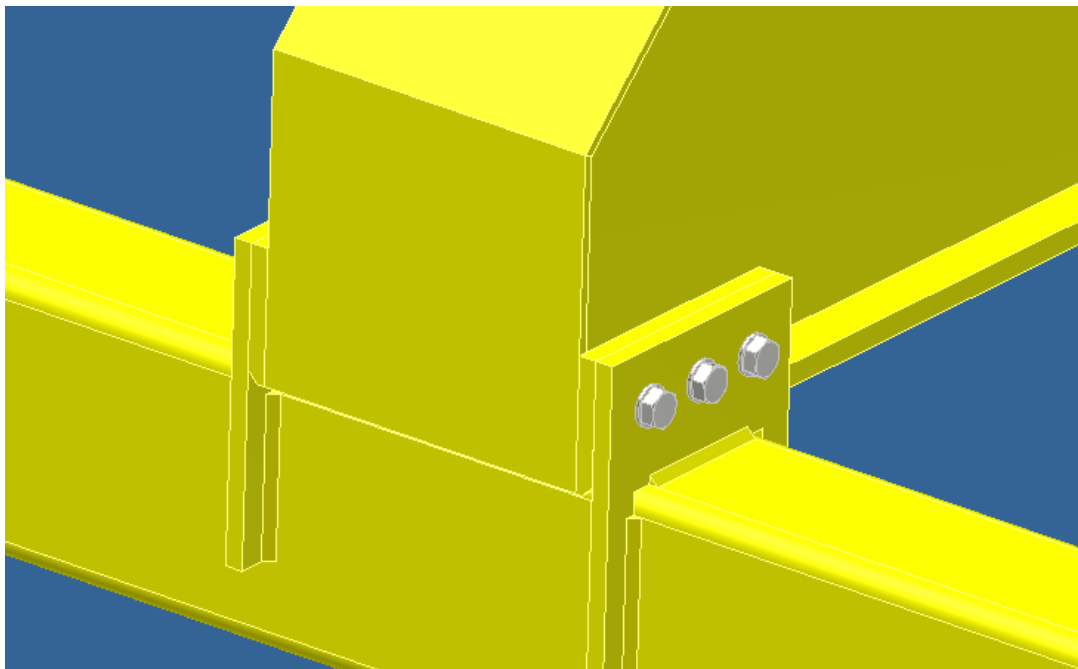
Kolové bloky (hnací i hnané) jsou připojeny k profilu příčniku pomocí dvou čepů zajištěných z obou stran pojistnými kroužky. Horizontální pozice bloku kola je pak vystředěna dvěma stavěcími šrouby s maticí.



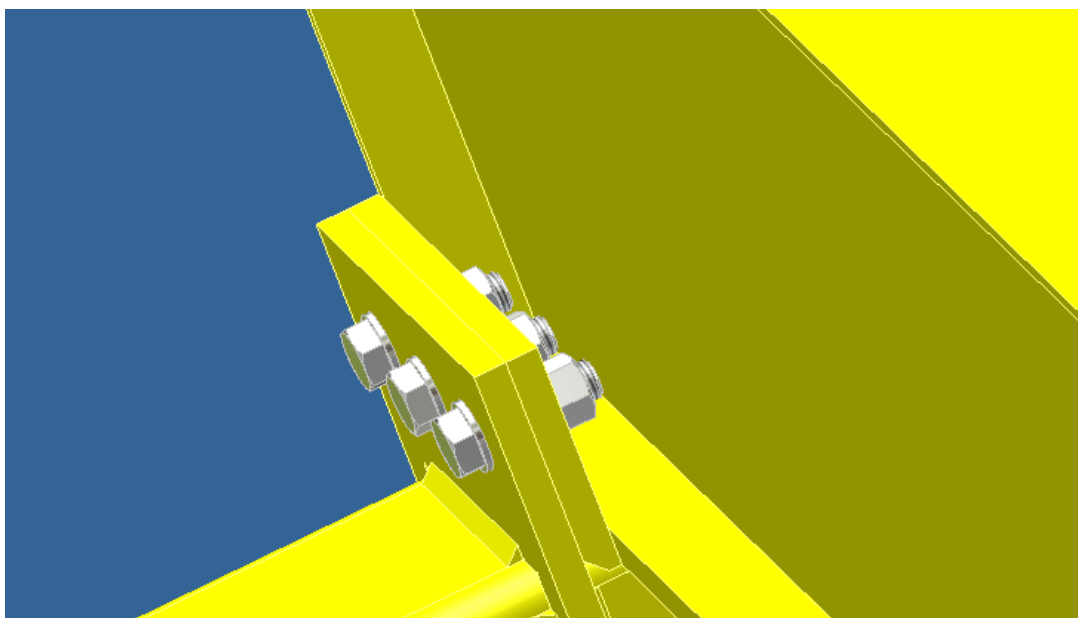
Obr. 32 Způsob montáže do příčniku [18]

10. SPOJENÍ HLAVNÍHO NOSNÍKU S PŘÍČNÍKEM

Spojení je provedeno pomocí šroubového spoje. Příruby příčnicku a hlavního nosníku jsou k sobě připojeny šesti šrouby M24.



Obr. 33 Připojení hlavního nosníku k příčnicku [vlastní práce]



Obr. 34 Připojení hlavního nosníku k příčnicku (detail) [vlastní práce]

ZÁVĚR

Na základě zadání byl v této diplomové práci proveden rozbor řešení konstrukčních řešení skříňových nosníků a vypracována technická zpráva s volbou řešení konstrukce jednonosíkového mostového jeřábu s důležitými pevnostními a technickými výpočty. Byla provedena pevnostní kontrola hlavního nosníku a příčnicku. Požadované parametry jeřábu pro výpočet byly: nosnost 10 000 kg, rozpětí 12 000 mm, rozvor kol pojezdu mostu 2 500 mm a zdvih 7 000 mm.

Během výpočtu se postupovalo na základě platných Českých státních norem a literatury, která se zabývá návrhem jeřábových konstrukcí. Nejprve bylo nutné provést návrh průřezu hlavního nosníku na základě dovoleného průhybu, z něhož se zjistil minimální kvadratický moment průřezu. Pomocí návrhových vztahů pro skříňové nosníky se vypočítaly rozměry plechů pro průřez. Poté následoval pevnostní výpočet hlavního nosníku. Podobným způsobem se postupovalo i při návrhu příčnicku. Výsledky ručního výpočtu vyhověly dovoleným hodnotám.

Jedna z posledních kapitol se zabývá pevnostní analýzou pomocí MKP (metoda konečných prvků). Tato analýza byla provedena v programu Nastran In-CAD 2017. Nosník byl zavazben vhodnými vazbami a zatížen příslušným silovým působením tak, aby co nejvíce odpovídal skutečným podmínkám. Výpočet byl uskutečněn pro polohu kladkostroje uprostřed nosníku. Hodnoty napětí a průhybu z MKP se mírně lišily od hodnot získaných ručním výpočtem. Tyto odchylky byly způsobeny neuvažováním příčných výztuh i odlišným podepřením hlavního nosníku u ručního výpočtu dle schémat. Nicméně výsledky vyhověly dovoleným hodnotám. Napěťové špičky vznikaly na bočních stěnách bloků pojezdových kol. Velikost tohoto napětí je zapříčiněna použitím neoriginálních modelů bloků kol, které neodpovídají garantované únosnosti z katalogu.

Na závěr byla vytvořena, po dohodě s vedoucím, vybraná výkresová dokumentace.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] EPOCH TIMES [online]. 2017 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.epochtimes.cz/2014101622403/Stavebni-jeřaby-a-jejich-historie.html>
- [2] BIGOŠ P., KULEKA J., KOPAS M., MANTIČ M. *Teória a stavba zdvíhacích a dopravných zariadení*. 1. vydání. TU v Košiciach, 2012. 356 s. ISBN 978-80-553-1187-6
- [3] GIGA s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.gigasro.cz/mostove-jeřaby-jednonosnikove.html>
- [4] GIGA s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.gigasro.cz/clanky-dodavka-mostoveho-jeřabu-o-nosnosti-50t-s-otocnou-kockou-pro-eltraf-a.s..html>
- [5] Katalog elektrické lanové kladkostroje GIGA [online]. 2010 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.gigasro.cz/elektricke-lanove-kladkostroje-rady-ghm.html>
- [6] DRAŽAN, F., KUPKA, L. a kolektiv. *Jeřáby – technický průvodce 13*. 1. vydání. Státní nakladatelství technické literatury Praha, 1968. 664 s.
- [7] GAJDUŠEK, Jaroslav a Miroslav ŠKOPÁN. *Teorie dopravních a manipulačních zařízení*. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988, 277 s. ISBN 55-517-88
- [8] REMTA, František, KUPKA, Ladislav, DRAŽAN, František. *Jeřáby I. díl*. 2. vydání. Státní nakladatelství technické literatury Praha, 1974. 645 s.
- [9] LEINVEBER, J., VÁVRA, P.. *Strojnické tabulky*. 3. doplněné vydání. Pedagogické nakladatelství Albra Úvaly, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.
- [10] ČSN EN 13001-2. *Jeřáby – Návrh všeobecně – Část 2: Účinky zatížení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 56 s.
- [11] ČSN EN 13001-3-1+A1. *Jeřáby – Návrh všeobecně – Část 3-1: Mezní stavy a prokázání způsobilosti ocelových konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 99 s.
- [12] ČSN EN 27 0103. *Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů – Výpočet podle mezních stavů*. Praha: Český normalizační institut, 1991. 68 s.
- [13] ČSN EN 15011. *Jeřáby – Mostové a portálové jeřáby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 80 s.
- [14] Katalog ocelových konstrukcí [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://oceltabulky.cz/>

- [15] KREJSA, M.: Smykové napětí v ohýbaných nosnících [online] [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/krejsa/studium/>
- [16] Conductix [online]. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: http://www.conductix.us/sites/default/files/downloads/KAT0180-0001-US_Bumpers_Cellular_-_Load_Diagrams.pdf
- [17] Conductix [online]. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: http://www.conductix.us/sites/default/files/downloads/TDB0180-0001-D_Cellpuffer.pdf
- [18] Krantechnik [online]. 2017 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.krantechnik.cz/pojezdove-komponenty>
- [19] ČSN ISO 4301/1. *Jeřáby a zdvihací zařízení. – Klasifikace – Část 1: Všeobecně.* Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1992. 8 s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	$[mm]$	Vzdálenost od vnitřní strany stojiny po okraj dolní příruby
a_1	$[mm]$	Vzdálenost kola kočky od podpory mostu
a_2	$[mm]$	Vzdálenost kola kočky od podpory mostu
a_k	$[mm]$	Vzdálenost kola kočky od podpory mostu
a_n	$[m/s^2]$	Zpomalení mostu při nárazu
b	$[mm]$	Šířka nosníku
b_1	$[mm]$	Vzdálenost kola kočky od podpory mostu
b_2	$[mm]$	Vzdálenost kola kočky od podpory mostu
b_p	$[mm]$	Šířka pásnice hlavního nosníku
b_{pp}	$[mm]$	Šířka pásnice příčnicku
b_s	$[mm]$	Šířka stojiny
c_{x2}	$[-]$	Součinitel pro okraj příruby
c_{zb}	$[-]$	Koeficient k výpočtu napětí ve stojině
c_{zm}	$[-]$	Koeficient k výpočtu napětí ve stojině
d	$[mm]$	Vzdálenost mezi vnitřní stranou stojiny a silou od kola kočky
E	$[MPa]$	Youngův modul pružnosti
e_{1p}	$[mm]$	Vzdálenost těžiště od horního krajního vlákna hlavního nosníku
e_{1t}	$[mm]$	Vzdálenost těžiště od dolního krajního vlákna hlavního nosníku
e_2	$[mm]$	Vzdálenost těžiště od bočního krajního vlákna hlavního nosníku
E_k	$[J]$	Kinetická energie mostu
e_s	$[mm]$	Vzdálenost těžiště od osy symetrie stojin
f_b	$[mm]$	Průhyb od hmotnosti kočky s břemenem
f_c	$[mm]$	Celkový průhyb hlavního nosníku
f_d	$[mm]$	Maximální dovolený průhyb hlavního nosníku
f_{dp}	$[mm]$	Maximální dovolený průhyb příčnicku
F_{kb}	$[N]$	Boční setrvačná síla na kole kočky
F_{kp}	$[N]$	Síla pod jedním kolem jeřábu
f_{mn}	$[mm]$	Průhyb od vlastní hmotnosti hlavního nosníku
F_{oL}	$[N]$	Síla od kola kočky na okraji příruby
f_p	$[mm]$	Průhyb příčnicku

F_{rA1}	$[N]$	Reakce v podporách – břemeno uprostřed nosníku
F_{rA12}	$[N]$	Reakce v podporách – kočka bez břemene uprostřed nosníku
F_{rA2}	$[N]$	Reakce v podporách – břemeno nejbliže k podpoře
F_{rA22}	$[N]$	Reakce v podporách – kočka bez břemene nejbliže podpoře
F_{rAh}	$[N]$	Reakce hlavního nosníku v horizontálním směru
F_{rAp}	$[N]$	Reakce v podpoře příčnicku
F_{rB1}	$[N]$	Reakce v podporách – břemeno uprostřed nosníku
F_{rB12}	$[N]$	Reakce v podporách – kočka bez břemene uprostřed nosníku
F_{rB2}	$[N]$	Reakce v podporách – břemeno nejbliže k podpoře
F_{rB22}	$[N]$	Reakce v podporách – kočka bez břemene nejbliže podpoře
F_{rBh}	$[N]$	Reakce hlavního nosníku v horizontálním směru
F_{rBp}	$[N]$	Reakce v podpoře příčnicku
F_{rBp1}	$[N]$	Zatěžující síla na příčník bez břemene
f_u	$[MPa]$	Mez pevnosti materiálu
g	$[m/s^2]$	Tíhové zrychlení
G_b	$[kg]$	Hmotnost břemene
G_p	$[kg/m]$	Hmotnost příčnicku na 1 m
H_b	$[N]$	Brzdná síla
h_{pd}	$[mm]$	Výška dolní pásnice
h_{ph}	$[mm]$	Výška horní pásnice
h_{pmin}	$[mm]$	Minimální výška pásnice
h_{pp}	$[mm]$	Výška pásnice příčnicku
h_s	$[mm]$	Výška stojiny
H_{tp}	$[N]$	Příčná síla
i	$[mm]$	Vzdálenost okraje dolní příruby od síly
I_{pxmin}	$[mm^4]$	Minimální kvadratický moment průřezu příčnicku v ose x
I_{pxskut}	$[mm^4]$	Skutečný kvadratický moment průřezu příčnicku v ose x
I_{xmin}	$[mm^4]$	Minimální kvadratický moment průřezu hl. nosníku v ose x
I_{xskut}	$[mm^4]$	Skutečný kvadratický moment průřezu hl. nosníku v ose x
I_{yskut}	$[mm^4]$	Skutečný kvadratický moment průřezu hl. nosníku v ose y
K_1	$[N]$	Síla pod kolem kočky s břemenem

K_{12}	$[N]$	Síla pod kolem kočky bez břemene
K_2	$[N]$	Síla pod kolem kočky s břemenem
K_{22}	$[N]$	Síla pod kolem kočky bez břemene
k_{z0}	$[-]$	Součinitel k výpočtu napětí ve stojině
k_{zh}	$[-]$	Součinitel k výpočtu napětí ve stojině
L	$[mm]$	Délka nosníku
L_p	$[mm]$	Délka příčnicku
M_b	$[Nmm]$	Ohybový moment ve vodorovné rovině
M_ε	$[Nmm]$	Maximální ohybový moment od bočních rázů
M_g	$[Nmm]$	Ohybový moment od hmotnosti nosníku
m_k	$[kg]$	Hmotnost kočky
m_n	$[kg]$	Hmotnost nosníku
M_{oks}	$[Nm]$	Moment od setrvačné síly od hmotnosti kočky
M_{omax1}	$[Nmm]$	Maximální moment na nosník
M_{omaxk}	$[Nmm]$	Moment na nosník od hmotnosti kočky
M_{opmax}	$[Nmm]$	Maximální moment na příčník
M_{opmin}	$[Nmm]$	Minimální moment na příčník
M_{opv}	$[Nmm]$	Vodorovný ohybový moment na příčník
M_{oqsm}	$[Nm]$	Moment od setrvačné síly od hmotnosti nosníku
m_{ost}	$[kg]$	Přídavná hmotnost ostatních komponent
m_p	$[kg]$	Hmotnost příčnicku
q_{sm}	$[N/m]$	Zatížení od setrvačných sil vlivem hmotnosti nosníku
q_v	$[N/m]$	Zatížení od větru
R_{fat_1}	$[MPa]$	Základní výpočtová pevnost při únavě $\chi=-1$
$R_{fatp\chi}$	$[MPa]$	Tlaková výpočtová pevnosti při únavě
R_{fatp0}	$[MPa]$	Tlaková výpočtová pevnost pro stanovení výpočtové pevnosti při únavě
$R_{fatt\chi}$	$[MPa]$	Tahová výpočtová pevnosti při únavě
R_{fatt0}	$[MPa]$	Tahová výpočtová pevnost pro stanovení výpočtové pevnosti při únavě
r_h	$[-]$	Poměrový koeficient

r_t	$[-]$	Poměr šířky stojiny a příruby
S	$[mm^2]$	Plocha průřezu hlavního nosníku
s_n	$[m]$	Stlačení nárazníku
$stat_n$	$[-]$	Statická únosnost nosníku
$stat_p$	$[-]$	Statická únosnost příčnicku
S_{xp}	$[mm^3]$	Statický moment průřezu příčnicku
t_f	$[mm]$	Výška dolní příruby
t_p	$[mm]$	Tloušťka stěny profilu příčnicku
t_w	$[mm]$	Šířka stojiny
v	$[m/s]$	Maximální rychlost mostu
V_n	$[m^3]$	Objem nosníku
W_{ox1}	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu v ose x - tlak
W_{ox2}	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu v ose x - tah
W_{oy}	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu v ose
W_{xp}	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu příčnicku v ose x
W_{yp}	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu příčnicku v ose y
z	$[mm]$	Posun těžiště profilu u příčnicku
γ_{p1}	$[-]$	Součinitel bezpečnosti
γ_{p2}	$[-]$	Součinitel bezpečnosti
γ_{p3}	$[-]$	Součinitel bezpečnosti
γ_{tp}	$[-]$	Součinitel zatížení od příčných sil
ε	$[-]$	Součinitel bočních rázů
λ	$[-]$	Součinitel přičení
λ_1	$[-]$	Součinitel k výpočtu lokálního ohybového napětí
ρ_0	$[kg/m^3]$	Hustota oceli
σ_{dov}	$[MPa]$	Dovolené napětí
σ_{gs}	$[MPa]$	Globální napětí v přechodu přírubu stojina
σ_{oc}	$[MPa]$	Celkové napětí v ohybu u nosníku
σ_{oh}	$[MPa]$	Horizontální ohybové napětí
σ_{ony}	$[MPa]$	Ohybové napětí v ose y
σ_{opx}	$[MPa]$	Ohybové napětí v ose x – tlak

σ_{otx}	[MPa]	Ohybové napětí v ose x – tah
σ_{pmax}	[MPa]	Maximální tlakové napětí v hlavním nosníku
σ_{pmin}	[MPa]	Minimální tlakové napětí v hlavním nosníku
σ_{sc}	[MPa]	Celkové napětí ve stojině v součtu s globálním
σ_{spx}	[MPa]	Ohybové napětí v příčnicku v ose x
σ_{spx}	[MPa]	Ohybové napětí v příčnicku v ose y
σ_{tmax}	[MPa]	Maximální tahové napětí v hlavním nosníku
σ_{tmaxpx}	[MPa]	Maximální tahové napětí ve spodní pásnici příčnicku
σ_{tmin}	[MPa]	Minimální tahové napětí v hlavním nosníku
σ_{tminpx}	[MPa]	Minimální tahové napětí ve spodní pásnici příčnicku
σ_{x2}	[MPa]	Lokální ohybové napětí ve spodní přírubě
σ_{z3}	[MPa]	Celkové napětí ve stojině
σ_{z3b}	[MPa]	Ohybové napětí ve stojině
σ_{z3m}	[MPa]	Membránové napětí ve stojině
τ_{sp}	[MPa]	Smykové napětí v příčnicku
τ_{spd}	[MPa]	Dovolené smykové napětí v příčnicku
ϕ_1	[-]	Dynamický součinitel
ϕ_2	[-]	Dynamický součinitel
Φ_5	[-]	Dynamický součinitel zrychlení
χ	[-]	Poměr mezních napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Historický jeřáb	11
Obrázek 2	Mostový jeřáb jednonosníkový	14
Obrázek 3	Mostový jeřáb dvounosníkový	14
Obrázek 4	Typy průřezů a uspořádání skříňových nosníků	15
Obrázek 5	Typy průřezů a uspořádání skříňových nosníků	17
Obrázek 6	Schéma pro výpočet pásnice	19
Obrázek 7	Průřez skříňového nosníku	20
Obrázek 8	Hlavní nosník	23
Obrázek 9	Schéma nosníku – břemeno uprostřed	25
Obrázek 10	Schéma nosníku – břemeno nejbliže podpoře	26
Obrázek 11	Maximální svislý ohybový moment na nosník	27
Obrázek 12	Schéma nosníku – kočka bez břemene uprostřed	28
Obrázek 13	Schéma nosníku – kočka bez břemene nejbliže podpoře	29
Obrázek 14	Lokální ohyb příruby	36
Obrázek 15	Napětí v přechodu příruba – stojina	42
Obrázek 16	Příčník	43
Obrázek 17	Průřez příčnicku	44
Obrázek 18	Schéma příčnicku – maximální svislé zatížení	46
Obrázek 19	Maximální ohybový moment v příčnicku	47
Obrázek 20	Schéma přičení	48
Obrázek 21	Diagram závislosti stlačení nárazníku na zatížení	54
Obrázek 22	Boční zatížení nosníku při nárazu	55
Obrázek 23	Statický průhyb od svislého napětí	58
Obrázek 24	Napětí od svislého zatížení	59
Obrázek 25	Napětí pod pojezdovými koly kočky při svislém namáhání	60
Obrázek 26	Detail napětí na horní pásnici při svislém namáhání	61
Obrázek 27	Absolutní hodnota deformace při zatížení kombinací C3	61
Obrázek 28	Napětí na horní pásnici při kombinaci namáhání C3	62
Obrázek 29	Detail napětí na dolní přírubě při kombinaci namáhání C3	63
Obrázek 30	Hnaný blok	64
Obrázek 31	Hnací kolový blok s převodovkou a motorem	64

Obrázek 32	Způsob montáže do příčnicku	65
Obrázek 33	Připojení hlavního nosníku k příčnicku	66
Obrázek 34	Připojení hlavního nosníku k příčnicku (detail)	66

PŘÍLOHY

Příloha č. 1:	Sestava mostu	č.d.	2-DP17-01
Příloha č. 2:	Sestava mostu – kusovník	č.d.	4-DP17-01-K
Příloha č. 3:	Sestava příčnicku	č.d.	3-DP17-02
Příloha č. 4:	Sestava příčnicku – kusovník	č.d.	4-DP17-02-K
Příloha č. 5:	Svařenec nosníku	č.d.	2-DP17-03
Příloha č. 6:	Svařenec nosníku – kusovník	č.d.	4-DP17-03-K